ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ФизикА.СПб

Санкт-Петербург
23-25 октября 2018

Тезисы докладов
международной конференции

ФизикА.СПб

23–25 октября 2018 года

Санкт-Петербург
2018

ББК 22.3:22.6

Ф 50

Организатор
ФТИ им. А. Ф. Иоффе

При поддержке
Российской академии наук
Администрации Санкт-Петербурга
ООО «ИННО-МИР»
Российского научного фонда
(соглашение № 14-42-00015 по проведению фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований международными научными группами)
Российский фонд фундаментальных исследований
(научный проект №18-02-20144)

Программный комитет
Аверкиев Никита Сергеевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — председатель
Арсеев Петр Иварович (ФИАН)
Варшалович Дмитрий Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Воробьев Леонид Евгеньевич (СПбГПУ)
Гавриленко Владимир Изяславович (ИФМ)
Дьяконов Михаил Игоревич (Université Montpellier II, France)
Иванчик Александр Владимирович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Калашникова Александра Михайловна (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Карачинский Леонид Яковлевич (ООО "Коннектор Оптикс")
Конников Семен Григорьевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Кучинский Владимир Ильич (СПбГЭТУ, ФТИ им. Иоффе)
Новожилов Виктор Юрьевич (СПбГУ)
Пихтин Никита Александрович (ООО «Эльфолюм», ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Рудь Василий Юрьевич (СПбПУ)
Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)
Степина Наталья Петровна (ИФП им. А. В. Ржанова)
Сурис Роберт Арнольдович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Нестоклон Михаил Олегович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Устинов Виктор Михайлович (НТЦ микроэлектроники РАН)

Организационный комитет
Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — председатель
Поняев Сергей Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — зам. председателя
Азбель Александр Юльевич (КЦФЕ)
Дюделев Владислав Викторович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Когновицкая Елена Андреевна (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)
Лосев Сергей Николаевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Петров Павел Вячеславович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Рябочкина Полина Анатольевна (МГУ им. Н. П. Огарёва)
Серин Артем Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Международная конференция 2018 года продолжает традицию Итоговых семинаров по физике и астрономии по результатам конкурсов грантов для молодых ученых, проводившихся в Санкт-Петербурге.

ISBN 978-5-00071-172-9

Использование современных численных и аналитических эфемеридов Луны

Загидуллин А. А.[1], Усанин В. С.[1], Петрова Н. К.[2], Нефедьев Ю. А.[1], Андреев А. О.[1]

[1]КФУ
[2]КГЭУ

Эл. почта: arhtur.zagidullin@yandex.ru

Изучение физических процессов, связанных с либрационными колебаниями естественных спутников планет солнечной системы является сложной и многопараметрической задачей. Это происходит по той причине, что на орбитально-вращательное движение спутников оказывают влияние все близколежащие небесные тела. Очевидно, таким влияниям подвержена и динамика Луны. В настоящее время исследования нашего естественного спутника проводятся на основе анализа разнородных данных, получаемых из гравиметрических, сейсмических, спутниковых наблюдений, а также лазерной локации Луны. В результате такого подхода точность определения параметров орбитально-вращательного движения Луны повысилась на один-два порядка по сравнению с концом XX-го столетия. Одними из самых точных, постоянно развивающихся динамических теорий Луны являются численные эфемериды серии DE, разрабатываемые в JPL NASA. Они учитывают множество тонких эффектов в динамике Луны и построены с использованием данных последних спутниковых измерений гравитационного поля Луны. В 2011 году Рамбо и Вильямс построили полуэмпирическую теорию физической либрации Луны, основанную на сравнении численной эфемериды DE421 с данными многолетней лазерной локации и последующего спектрального анализа остаточных разностей [1]. Результаты этой работы представлены в виде аналитических рядов, описывающих не только главную проблему теории физической либрации Луны (ФЛЛ), но и возмущения от планет, а самое главное – параметры свободных либраций упругой Луны. Недавняя переобработка данных лазерной локации Луны китайскими исследователями [2] с использованием эфемериды DE430 позволила значительно уточнить параметры свободных либраций. На сегодняшний день данные полуэмпирические ряды ФЛЛ предоставлены для использования учёным во всем мире.

В нашей работе были выполнены исследования полуэмпирической теории ФЛЛ и разработан пакет программ, позволяющих получать значения углов физической либрации на заданный момент времени и приведения их к стандартной системе координат.

Также была проанализирована задача трансформации классических параметров либрации в эйлеровых углах в самолётные углы. Последние использовались при разработке авторской численной теории ФЛЛ.

В результате выполненной авторами статьи работы появилась возможность получать компоненты физической либрации как в углах Эйлера, так в самолетных углах. Анализ остаточных разностей при сравнении с данными Рамбо и Вильямса показывает достаточно хорошую точность полученных нами параметров.

Исследование проводится в рамках федеральной Программы повышения конкурентоспособности Казанского федерального университета и поддержано грантом РФФИ 15-02-01638-а

Список литературы

1. Rambaux N., Williams J.G., The Moon's physical librations and determination of their free modes, Celest. Mech. Dyn. Astr. 109, 85– 100, 2011;
2. Yang Y.-Z., Li J.-L., Ping J.-S., Hanada H., Determination of the free lunar libration modes from ephemeris DE430, Research in Astronomy and Astrophysics, Volume 17, Issue 12, Number article 127, 2017.

Анализ глобальной цифровой модели Земли, выполненный с использованием методов фрактальной геометрии и гармонического разложения по сферическим функциям

Демин С. А.[1], Андреев А. О.[1], Демина Н. Ю.[1], Нефедьев Ю. А.[1]

[1]КФУ

Эл. почта: serge_demin@mail.ru

В ходе осуществления космических миссий по исследованию Солнечной системы был собран значительный объем данных о геофизике планет и их морфологических свойствах, которые могут быть изучены при помощи методов фрактального анализа [1]. Настоящая работа направлена на исследование цифровой модели Земли *GDEM* (Global Digital Elevation Model), построенной на основе данных измерений *ASTER* (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) [2, 3]. Космический радиометр теплового излучения и отражения установлен на платформе космического аппарата *Terra* (NASA). Исследование выполнялось с использованием многопараметрического гармонического анализа и методов фрактальной геометрии. Следует отметить, что самоподобие и масштабная инвариантность исследуемых объектов методами фрактального анализа позволяют качественно описать структуру поверхности небесных тел [4]. Многопараметрический гармонический анализ и разложения по сферическим функциям использовались при построении модели физической поверхности Земли на основе данных *GDEM*. В настоящей работе получены значения фрактальных размерностей поверхности Земли, которая имеет неоднородную структуру. Фрактальные размерности определены

для географических широт в зависимости от заданных значений долгот. Были получены независимые оценки макроструктуры Земли, которые можно использовать для новой интерпретации геофизических процессов. Для определенных областей поверхности Земли было найдено хорошее согласие фрактальных размерностей. Таким образом, как уже отмечалось в работах [5, 6], сравнительный фрактальный анализ позволяет проводить исследование моделей макроповерхностей небесных тел, построенных на основе данных космических миссий, и изучать не только их неоднородную структуру, но и процессы эволюции.

Исследование выполнено в рамках федеральной Программы повышения конкурентоспособности Казанского федерального университета, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 16-32-60071-мол_а_дк (Н.Д.) и 18-32-00895-мол_а.

Список литературы

1. Turcotte, D.L., A fractal interpretation of topography and geoid spectra on the Earth, Moon, Venus, and Mars, Journal of Geophysical Research, V. 92, Issue B4, 1987, pp. 597–601;
2. Abrams, M., The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform, International Journal of Remote Sensing, V. 2, Issue 5, 2000, pp. 847–859;
3. Yue, L.W., Shen, H.F., Zhang, L.P., Zheng, X.W., Zhang, F., Yuan, Q.Q., High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, V. 123, 2017, pp. 20–34;
4. Steinke, T.F., Collier, M.L., McGovern, P.J., Clifford, S.M., Martian geomorphology from fractal analysis of drainage networks, Journal of Geophysical Research: Planets, V. 109, Issue 2, 2004, pp. E02005-1–E02005-12;
5. Linkevich, A.D., Representation of Information in Dynamical Systems: Measures, Entropy and Fractals, Nonlinear Phenomena in Complex Systems, V. 2, No. 4, 1999, pp. 93–104;
6. Massopust, P.R., Fractal Functions, Fractal Surfaces, and Wavelets, Academic Press, Inc., San Diego, California, 1994, pp. 1–383.

Создание имитационных моделей лунных наблюдений

Демина Н. Ю. [1], Петрова Н. К.[2], Загидуллин А. А.[1], Андреев А. О.[1], Нефедьев Ю. А.[1], Демин С. А.[1]

[1]КФУ
[2]КГЭУ

Эл. почта: vnu_357@mail.ru

Цель данной работы – построение оптимальных параметров имитационных моделей лунного телескопа. Моделирование наблюдений, выполненных с поверхности Луны

автоматизированным телескопом, производится на основе динамических алгоритмов, описывающих суточные движения звезд и специально разработанных программных модулей. В настоящее время большие надежды возлагаются на российские лунные проекты, включающие использование наблюдательной и навигационной техники, установленной на лунный реголит. Первые шаги в разработке имитационных моделей были сделаны при проектировании миссии *ILOM* (Selene II). Данная миссия предусматривает установку оптического телескопа на одном из полюсов Луны [1–3]. Основная задача миссии будет заключаться в наблюдениях физической либрации Луны непосредственно с ее поверхности с целью выявления тонких эффектов, связанных с характеристиками внутреннего строения нашего естественного спутника: уточнение числовых значений коэффициентов упругости Лява, параметров приливной диссипации и диссипации на границе «ядро-мантия», размеров и эллиптичности ядра, его химического состава. Для приема и регистрации изображения звезд была разработана ПЗС-матрица высокого разрешения. Следует отметить, что наблюдения с лунной поверхности освобождены от атмосферных флуктуаций, а также нет необходимости учитывать кинематику и динамику Земли [4], хотя здесь появляется достаточно сложное либрационное и вращательное движение самой Луны. Расчетная точность измерения звездных координат должна составлять 1 миллисекунду дуги, наблюдательный цикл продлится 450 дней. В нашем случае считается, что телескоп будет работать на постоянной основе. Модельные эксперименты показали, что остаточные разности для либрации по долготе, как и предсказывалось теоретически, остаются на нулевом уровне и не зависят от введения различных структурных параметров для селеноида. К полученным значениям остаточных разностей либраций по широте и наклону был применен метод быстрого преобразования Фурье. В итоге в полученном частотном спектре был обнаружен ряд гармоник, которые имели определенную корреляцию с параметрами упругости и вязкости [5]. Учет при моделировании упругости приводит к смещениям в положении звезд и изменению либрационных углов. Также существует зависимость от числа Лява k_2. Члены разложения, соответствующие эффекту «вязкости», имеют фазовый сдвиг у гармоник для упругой Луны. Таким образом, обнаруженные гармоники оказались наиболее зависимыми от вязкоупругих свойств Луны и их можно использовать с целью определения значений параметров вязкости и упругости Луны. Результаты настоящей работы позволят выполнять развитие теории физической либрации и динамики Луны с целью их применения для редукции будущих лунных наблюдений, выполненных с помощью автоматизированного оптического телескопа.

Исследование проводится в рамках федеральной Программы повышения конкурентоспособности Казанского федерального университета, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 16-02-00496-а, 16-32-60071-мол_а_дк (Н.Д.), 18-32-00895-мол_а.

Список литературы

1. Hanada, H., Noda, H., Kikuchi, F., et al., Different kind of observations of lunar rotation and gravity for SELENE-2, Proc of Conf. Astrokazan–2009: Kazan, Russia, 2009, pp. 172–175;

2. Hanada, H., Ping, J., Funazaki, K., et al.,, Proc. of LAG Symp. on terrestrial gravimetry: Saint Petersburg, Russia, 2010, pp. 125–129;
3. Hanada, H., Araki, H., Tazawa, S., et al., Development of a digital zenith telescope for advanced astrometry, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, V. 55, No. 4, 2012, pp. 723–732;
4. Petrova, N., Analytical extension of Lunar libration tables, Earth, Moon and Planets, V. 73, No. 1, 1996, pp. 71–99;
5. Petrova, N., Hanada, H., Computer simulating of stellar tracks for observations with the lunar polar telescope, Planetary and Space Science, V. 68, 2012, pp. 86–93.

Анализ топоцентрических и гравиметрических данных современных космических миссий

Андреев А. О.[1], Демина Н. Ю.[1], Загидуллин А. О.[1], Петрова Н. К.[2], Нефедьев Ю. А.[1], Демин С. А.[1]

[1]КФУ
[2]КГЭУ

Эл. почта: alexey-andreev93@mail.ru

Настоящая работа посвящена анализу современных данных лунных космических миссий и наземных проектов: “Clementine” [1]; “Lunar Prospector” [2]; лазерная локация Луны [3]; европейский спутник “SMART-1” [4]; японский проект “KAGUYA” [5]; китайские миссии: “Chang’e-1”, “Chang’e-2” (2010 г.), “Chang’e-3” (2013 г.) [6]; индийские аппараты: “Chandrayaan-1” (с 2008 по 2009 гг.), “Chandrayaan-2” (2017 г.) [7]; “LRO/LCROSS ” (с 2009 по 2010 гг.) [8]; “LRO” (с 2009 по 2014 гг.) [9]; “GRAIL” (2012 г.) [10]. В работе рассматриваются методы и алгоритмы построения динамической модели физической поверхности Луны. Особое внимание уделено проекту “LRO”. С помощью этого космического аппарата были получены уникальные снимки поверхности Луны с высоким разрешением. Миссия “LRO” стала первым серьезным шагом в реализации долгосрочной программы по созданию пилотируемых лунных баз, которые планируется создать в 2020-е гг. Миссия “LRO” должна была помочь найти наиболее подходящие площадки для прилунений. С этой целью искались источники кислорода и воды и проводились исследования радиационной обстановки в окололунном пространстве. Эти задачи решались шестью научными инструментами, установленными на “LRO”. 2007 год стал годом начала космических проектов Японии, Китая и Индии. Также необходимо отметить японскую миссию “SELENE” (KAGUYA), с помощью которой выполнены высокоточные топографические и гравитационные наблюдения всей поверхности Луны, включая обратную сторону Луны и лунные полюса. Китайский спутник “Chang’e-1” и индийский аппарат “Chandrayan-1” дали новые данные о гравитационном поле, масконах, коре и геохимическом составе Луны. Также следует отметить, что важная информация о динамике Луны была получена посредством наблюдений за физической либра-

цией Луны (ФЛЛ). В работе рассмотрены современные подходы к решению данной задачи с помощью наблюдений, выполняемых с лунной поверхности лунным телескопом, установки налунных лазерных маяков и теоретического моделирования ФЛЛ. Исследование вращения небесных объектов позволяет понять их сложную внутреннюю структуру, что особенно актуально в условиях отсутствия возможностей использования других методов.

Исследование проводится в рамках федеральной Программы повышения конкурентоспособности Казанского федерального университета и поддержано грантами РФФИ 16-02-00496-а, 16-32-60071-мол_а_дк (Н.Д.) и 18-32-00895-мол_а.

Список литературы

1. Smith, D.E., Zuber, M.T, Neumann, G.A., et al., J. Geophys. Res., V. 102, 1997, pp. 1591-1611;
2. Binder, A.B., Science, V. 281, Issue 5382, 1998, pp. 1475-1476;
3. Hofmann, F., Biskupek, L., Müller, J., Journal of Geodesy, No. 1, 2018, pp. 1-13;
4. Burchell, M.J., Robin-Williams, R., Foing, B.H., Icarus, V. 207, Issue 1, 2010, pp. 28-38;
5. Araki, H., Tazawa, S., Noda. H., et al., Science, V. 323, 2009, pp. 897-900;
6. Yang, A., Li, X., Xie, J., et al., Survey Review, V. 47, Issue 343, 2015, pp. 296-305;
7. Bagla, P., Science, V. 359, Issue 6375, 2018, pp. 503-504;
8. Vondrak, R., Keller, J., Chin, G., et al., Space Science Reviews, V. 150, Issue 1-4, 2010, pp. 7-22;
9. Mazarico, E., Rowlands, D.D., Neumann, G.A., et al., J. Geod., V. 86, Issue 3, 2012, pp. 193-207;
10. Konopliv, A.S., Park, R.S., Yuan, D.-N., et al., J. Geophysical Research: Planets, V. 118, Issue 7, 2013, pp. 1415-1434.

Основное состояние и квантование Энергии материи во вселенной Фридмана

Шаврин А.[1], Горобей Н. Н.[1], Лукьяненко А. С.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: shavrin.andrey.cp@gmail.com

Энергия замкнутой вселенной Фридмана представлена в виде разности двух положительных величин – энергии материи и энергии расширения пространства, которые равны в силу классического уравнения связи. В квантовой теории рассматриваем задачу на минимум (экстремум) среднего значения энергии материи при дополнительном условии выполнения уравнения связи также в среднем. В результате получаем спектр допустимых значений энергии материи во вселенной. Минимальное значение энергии соответствует основному состоянию вселенной, которое естественно рассматривать также в качестве ее начального состояния [1]. Предложена toy-модель, в которой степени свобо-

ды материи и геометрии описываются гармоническими осцилляторами с одним подгоночным параметром – средним объемом вселенной, который находится самосогласованно из условия экстремума энергии. Собственные состояния и собственные значения энергии материи найдены в этом самосогласованном гармоническом приближении. Поскольку эти состояния не являются собственными для оператора Гамильтона вселенной, основное состояние не будет стационарным и с него начинается динамика расширения вселенной [2]. Эта динамика рассмотрена с использованием формализма собственного времени [3] в случае, когда полем материи служит скалярное поле. Получена вероятность рождения вселенной с заданными значениями скалярного поля и радиуса из «ничего».

Список литературы

1. Gorobey N. and Lukyanenko A., Ground state of the universe in quantom cosmology // J.Mod. Phys A, 2016, 31 No. 02n03, p. 1641014;
2. Н.Н.Горобей, А.С.Лукьяненко, М.Свинцов, О начальном состоянии вселенной в теории инфляции // Нучно-технические ведомости СПбПУ. Физико-математические науки. 2017, Т.10, №2, с.115-122;
3. N.Gorobey, A.Lukyanenko and I.Lukyanenko, Quantum action principle in relativistic mechanics (II)/arXiv:1010.3824v1[quant-ph], 2010.

Белые дыры в обобщенном пространстве-времени Вайдья

Вертоградов В. Д.[1], Pankaj Joshi[2]

[1]РГПУ
[2]Tata Institute of Fundamental Research, India

Эл. почта: vdvertogradov@gmail.com

Рассматриваются различные модели гравитационного коллапса обобщенного пространства-времени Вайдья результатом которых, при разумных физических условиях, могут быть белые дыры, сингулярности типа сингулярности будущего в модели Фридмана и вечные в будущем голые сингулярности. Также объясняется природа белодырных геодезических при помощи образования голой сингулярности и регулярных черных дыр.

Исследование влияния негравитационных эффектов на некоторые потенциально опасные астероиды

Мартюшева А. А.[1]

[1]ГАО РАН

Эл. почта: alex.mart13@gmail.com

На телескопах Главной (Пулковской) Астрономической обсерватории РАН МТМ-500М и ЗА-320М были выполнены наблюдения потенциально опасных астероидов 2014 JO25, (418094) 2007 WV4, (276033) 2002 AJ129, сближающихся с Землей. Для исследования эволюции орбит, связанных с негравитационными эффектами, был произведен учет светового давления и исследовано влияние эффекта Ярковского. Отклонения в орбитальном движении были вычислены для различных численных значений отражающей поверхности данных объектов. Получены результаты о влиянии негравитационных эффектов на орбиты опасных для Земли астероидов.

Список литературы

1. Мартюшева А.А., Петров Н.А., Поляхова Е.Н. Вестник СПбГУ, том 2 (60), вып. 1, стр. 135-147, 2015;
2. Виноградова Т.А., Железнов Н.Б., Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А., Шор В.А. Труды ИПА РАН, вып. 9, 2003.

Исследование потенциально опасных астероидов 2002 AJ129 и 2017 VR12 в периоды их тесных сближений с Землей

Петрова С. Н.[1], Девяткин А. В.[1], Горшанов Д. Л.[1]

[1]ГАО РАН

Эл. почта: stalkered@yandex.ru

В феврале и марте 2018 г. на двух телескопах Пулковской обсерватории (ГАО РАН) ЗА-320М и МТМ-500М были произведены наблюдения астероида 2017 VR12, открытого в ноябре 2017г., и астероида 276033 (2002 AJ129), чья орбита пересекает не только Земную орбиту, но также орбиты Меркурия и Венеры. По классификации Центра Малых Планет оба астероида являются потенциально опасными. В рамках наблюдений, проведенных в периоды тесных сближений астероидов с Землёй (для 2017 VR12 данное сближение было первым зафиксированным после открытия), были получены астрометрические и фотометрические данные. После обработки данных удалось уточнить элементы орбит обоих объектов, исследовать эволюцию их орбит, были построены их кривые блеска, установлены периоды их осевого вращения и определены спектральные классы.

Уравнение состояния межгалактического вещества ранней Вселенной

Теликова К. Н.[1], Балашев С. А.[1], Штернин П. С.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: ks.telikova@mail.ru

Возникновение галактик на красном смещении z~10 запускает реионизацию межгалактического вещества. С этого момента его эволюция определяется процессами звездообразования и образования активных ядер галактик. Характер формирования структуры Вселенной и динамика процессов реионизации отражаются в уравнении состояния межгалактического вещества и его изменении с красным смещением.

Одним из методов, позволяющих изучать уравнение состояния межгалактической среды, является анализ Лайман-альфа леса — линий поглощения нейтрального водорода в спектрах квазаров. Положение одиночной линии в Лайман-альфа лесе определяется красным смещением z соответствующей абсорбционной системы, попавшей на луч зрения квазар-наблюдатель, а профиль линии определяется лучевой концентрацией нейтрального водорода N и параметром Допплера b (то есть шириной распределения по скоростям атомов нейтрального водорода в абсорбционной системе). Разброс атомов по скоростям определяется как температурой газа (то есть уравнением состояния межгалактического вещества), так и особенностями индивидуальной системы. Как правило, наряду с тепловым движением в абсорбционной системе присутствуют турбулентные движения, приводящие к дополнительному уширению профиля линии (росту b по сравнению с чисто тепловым уширением). В результате, распределение абсорбционных систем на плоскости N-b демонстрирует ярко выраженную нижнюю границу, отвечающую минимальному вкладу турбулентных движений. Определение положения этой границы в зависимости от z устанавливает, таким образом, ограничения на эволюцию параметров уравнения состояния межгалактического вещества.

В работе представлена усовершенствованная автоматическая процедура анализа спектров квазаров, позволяющая определять N и b для одиночных линий поглощения Лайман-альфа леса. Поиск линий осуществляется методом кросс-корреляции с модельными спектральными профилями, рассчитанными на плотной сетке. Параметры найденных линий затем уточняются стандартной процедурой минимизации по критерию χ^2. Финальным этапом является прополка полученной выборки от линий металлов. Мы применили разработанную процедуру к большой выборке спектров квазаров высокого разрешения, полученных на телескопах KECK и VLT.

Полученное распределение абсорбционных систем в пространстве параметров N-b аппроксимировалось модельной функцией распределения, явным образом учитывающей наличие нижней границы. При этом допускалось наличие возможных статистических выбросов, например, систем, параметр b которых существенно меньше теплового и не может быть описан в рамках принятой модели. Для учёта таких выбросов использовался робастный метод, основанный на одновременном моделировании искомого распределе-

ния и распределения выбросов в рамках байесовского подхода. Параметры распределений определялись с использованием метода Монте-Карло по схеме марковских цепей. В результате мы поставили надёжные ограничения на эволюцию параметров уравнения состояния межгалактического вещества в диапазоне красных смещений z~2-3.

Связь нётеровского и метрического тензоров энергии-импульса для различных теорий тензорных полей

Ильин Р. В.[1], Пастон С. А.[1]

[1]СПбГУ

Эл. почта: st030779@student.spbu.ru

Мы изучаем связь двух известных выражений для тензора энергии-импульса, а именно нётеровского $T_N^{\mu\nu}$, 0μ -компоненты которого есть плотности сохраняющихся энергии и импульса, и метрического $T^{\mu\nu}$, являющегося источником в уравнениях Эйнштейна. Для теорий с не более чем вторыми производными полей в лагранжиане известно, что эти тензоры связаны друг с другом следующим образом:

$$T_N^{\mu\nu} = T^{\mu\nu} + \partial_\alpha B^{\alpha\mu\nu},$$

где $B^{\alpha\mu\nu}$ антисимметрично по первым двум индексам. Обобщение же этого обстоятельства на случай тензорных полей произвольной размерности с произвольным числом производных в лагранжиане наталкивается на некоторые трудности.

В этом докладе будет представлена схема доказательства аналога указанного выше соотношения для таких теорий. Мы покажем, что в случае, если лагранжиан зависит от полей и их производных до порядка *n* включительно, справедливо следующее равенство:

$$T_N^{\mu\nu} = T^{\mu\nu} + \partial_{\alpha_1} B^{\alpha_1\mu\nu} + \ldots + (-1)^n \partial_{\alpha_1} \ldots \partial_{\alpha_n} B^{\alpha_1 \ldots \alpha_n \mu\nu},$$

где величины *B* таковы, что их полностью симметричная часть по первым *n+1* индексам равна нулю. Также будет обсуждаться приложение этого результата к некоторым вопросам классической и квантовой теории поля.

Фотоионизация водородоподобных ионов в сильном магнитном поле

Демидов И. В.[1], Потехин А. Ю.[2]

[1]СПбАУ РАН,
[2]ФТИ

Эл. почта: dvsmallville@gmail.com

В работе изучается взаимодействие фотонов с положительно заряженными одноэлектронными ионами в сильном магнитном поле (10^{11}-10^{15} Гс) с учетом квантования движения обеих взаимодействующих частиц — электрона и атомного ядра. Квантово-механическая задача о движении иона в сильном магнитном поле обладает рядом трудностей. В частности, движение центра масс иона не отделяется от движения его внутренних степеней свободы, вследствие чего переменные в уравнении Шредингера не разделяются. Для описания квантовых состояний рассматриваемой системы был построен подходящий базис разложения волновой функции, в котором решение трехмерной двухчастичной задачи сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений, связанных между собой посредством легко вычисляемых эффективных потенциалов. На основе полученного разложения были найдены соотвтествующие силы осцилляторов, характеризующие связанно-свободные переходы, а также полное сечение фотоионизации. Результаты работы могут быть полезны при интерпретации наблюдаемых спектров излучения магнитаров — нейтронных звезд со сверхсильными магнитными полями.

Молекулярные облака HD/H_2 в ранней Вселенной

Косенко Д. Н.[1], Балашев С. А.[2], Иванчик А. В.[2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ

Эл. почта: kosenkodn@yandex.ru

В данной работе представлен систематический обзор DLA систем с большим красным смещением, содержащих молекулы H_2 и HD. DLA системы — это абсорбционные системы, идентифицируемые в спектрах квазаров, содержащие высокую лучевую концентрацию нейтрального водорода: $N(HI) > 2\times10^{20}$ см$^{-2}$. Считается, что DLA системы относятся к основной группе популяций галактик на больших красных смещениях. В представленной работе был выполнен систематический обзор новых DLA систем, содержащих одновременно молекулы H_2 и HD. Обсуждается возможность оценки относительной концентрации дейтерия D/H (и следовательно относительного содержания барионов во Вселенной, Ω_b) на основе измерения отношений лучевых концентраций N(HD)/N(H_2), а также влияние химии межзвездной среды на эту оценку.

Систематические эффекты и самосогласованность в методике определения распространенности первичного гелия

Куричин О. А. [1], Иванчик А. В.[1,2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ

Эл. почта: o.chinkuir@gmail.com

Измерение распространенности легких химических элементов является хорошим тестом «Стандартной модели первичного нуклеосинтеза», однако измерить распространенность с точностью до нескольких процентов возможно только для ^{4}H.Определение этой величины производится по наблюдениям спектральных линий от малометаличных внегалактических источников (зон HII) в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах. По интенсивностям запрещенных линий [OIII] и [SII] определяются физические характеристики источника, такие как температура и концентрация электронов. Интенсивности линий ^4He позволяют определить концентрацию этого элемента в источнике. Однако, существуют различные систематические эффекты, влияющие на корректное определение этой физической величины. К ним относятся (1) межзвездное покраснение, (2) излучательная способность *He*, (3) усиление линий *H* и *He* за счет других источников, находящихся за исследуемым объектом, (4) температурная и (5) ионизационная структура зоны *HII*, (6) столкновительное усиление линий H и *He*. Неучет этих эффектов может приводить как к завышению, так и к занижению итоговой оценки распространенности ^4He на несколько процентов.

На данный момент существует две ведущие независимые группы исследователей, занимающихся этой проблемой. Результаты по вычислению с использованием одного и того же набора исходных данных у этих групп следующие: $Y_p = 0.2551 \pm 0.0022$ [1] и $Y_p = 0.2449 \pm 0.0040$ [2]. Только последний результат согласуется с результатом анализа данных, полученным при изучении анизотропии CMB на спутнике Planck [3]. Однако, значения Y_p, полученные этими группами, не совпадают даже в пределах погрешности, и на данный момент нет однозначного ответа на вопрос, кто из этих двух групп прав. В работе изучаются различия в методиках обработки данных и получения величины распространенности первичного гелия, в частности исследуется, как группы учитывают вышеприведенные систематичексие эффекты. Производится анализ погрешностей и сравнительные тесты с целью выяснения правоты одной из групп.

Список литературы

1. Y. I. Izotov, T. X. Thuan and N. G. Guseva, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 445, 778 (2014);
2. E. Aver, K.A. Olive, and E.D. Skillman, J. Cosmol. Astropart. Phys. 07, 011, (2015);
3. P. A.R. Ade et al., Astron. & Astrophys. 594, A13 (2016).

Мазерное излучение на гравитационных состояниях на поверхности нейтронных звезд

Тепляков Н. В.[1], Вовк Т. А.[1], Рухленко И. Д.[1], Рождественский Ю. В.[1]

[1]ИТМО

Эл. почта: tepliakov.nikita@gmail.com

Нейтронные звезды – это сильно намагниченные и быстро вращающиеся астрономические объекты с чрезвычайно высокой плотностью и ярко выраженным пульсирующим излучением. Хотя механизм рентгеновского и гамма-излучения от изолированных нейтронных звезд достаточно хорошо известен, происхождение их радиоизлучения попрежнему неизвестно, и существует несколько противоречивых моделей этого явления [1]. Поскольку яркостная температура радиоизлучения значительно превышает кинетическую энергию излучающих частиц на нейтронных звездах, это излучение должно иметь когерентный характер. Когерентность излучения может быть обусловлена антенным механизмом, который предполагает, что излучающие частицы находятся в крошечных областях, размеры которых намного меньше длины волны излучения [2]. Кроме того, нейтронная звезда может представлять собой астрофизический мазер, излучение в котором производится заряженными частицами, движущимися вдоль искривленных линий магнитного поля, или комптоновским рассеянием в релятивистской плазме [3].

В данной работе предлагается новый механизм радиоизлучения пульсаров, основанный на переходах электронов между гравитационными состояниями на поверхности нейтронной звезды. Энергетический зазор между этими состояниями определяется напряженностью гравитационного поля, поэтому гравитационные состояния очень трудно наблюдать на Земле [4], но они могут становится источником радиоизлучения на нейтронных звездах. В предложенном механизме когерентное излучение возникает при электрических и магнитных дипольных переходах электронов, падающих на полярные шапки пульсара, и попадает в радиочастотный диапазон — в полном соответствии с наблюдаемыми спектрами излучения. Показано, что линейно поляризованное электрическое дипольное излучение распространяется параллельно поверхности нейтронной звезды и имеет веерообразный угловой спектр, тогда как магнитное дипольное излучение распространяется от магнитных полюсов пульсара в виде двух узких пучков, эллиптически поляризованных из-за спин-орбитального взаимодействия электронов в магнитном поле. Объясняя основные наблюдаемые характеристики радиоизлучения пульсаров, предложенный механизм указывает на то, что гравитационный квантовый конфайнмент играет существенную роль в физике нейтронных звезд.

Список литературы

1. Gedalin M., Gruman E., Melrose D., Mechanism of pulsar radio emission, Mon. Not. R. Astron. Soc., 337, 422-430, 2002;
2. Ginzburg V., Zheleznyakov V., Zaitsev V., Coherent mechanisms of radio emission and magnetic models of pulsars, Astrophys. Space Sci., 4, 464-504, 1969;

3. Mitra D., Gil J., Melikidze G.I., Unraveling the nature of coherent pulsar radio emission, Astrophys. J. Lett., 696, L141-L145, 2009;
4. Nesvizhevsky V.V., Börner H.G., Petukhov A.K., Abele H., Baeßler S., Rueß F.J., Stöferle T., Westphal A., Gagarski A.M., Petrov G.A., Strelkov A.V., Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field, Nature, 415, 297-299, 2002.

Моделирование диффузии ускоренных частиц вблизи бесстолкновительных ударных волн в космической плазме с различным химическим составом

Кропотина Ю. А.[1], Быков А. М.[1], Красильщиков А. М.[1], Левенфиш К. П.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: juliett.k@gmail.com

Выполнено гибридное моделирование диффузии ускоренных частиц в предвестнике и за фронтом бесстолкновительных ударных волн в космической плазме. Диффузия в среде с различным химическим составом промоделирована как в режиме пробных частиц, движущихся в заданном турбулентном электромагнитном поле, так и самосогласованно, то есть, одновременно с моделированием эволюции ударной волны. Полученные результаты указывают на наличие нескольких режимов диффузии в зависимости от энергии ускоренных частиц, а также демонстрируют особенности процесса диффузии в плазме с существенной примесью тяжёлых слабо заряженных ионов. В то же время, для различных сортов ионов наблюдается общий характер зависимости коэффициента диффузии от энергии частиц. Полученные результаты могут быть применены для моделирования процесса ускорения космических лучей на бесстолкновительных ударных волнах в оболочках остатков сверхновых.

Нагрев нейтронных звёзд за счёт диссипации магнитного поля в их ядрах

Офенгейм Д. Д.[1], Гусаков М. Е.[1], Кантор Е. М.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: ddofengeim@gmail.com

Нейтронные звёзды (НЗ) являются естественными «лабораториями» для изучения вещества в экстремальных условиях. Плотность недр этих звёзд может в несколько раз превышать плотность ядерной материи, температура недр достигает $\sim 10^9$ К. Особый интерес представляют магнитары — нейтронные звёзды, обладающие сверхсильными

магнитными полями, до 10^{15} Гс и выше [1]. Такое сильное магнитное поле приводит к появлению внутреннего нагрева магнитаров и, как следствие, к высокой температуре их поверхности в сравнении с другими звёздами такого же возраста. В данной работе рассмотрена диссипация магнитного поля в несверхтекучих ядрах нейтронных звёзд, состоящих из нейтронов, протонов и электронов. Учтены три основные механизма диссипации – амбиполярная диффузия, неравновесные бета-процессы и омическое затухание токов [2]. С помощью метода, предложенного в [3], для различных условий в недрах НЗ рассчитана мощность объёмного энерговыделения в ядре и поток энергии магнитного поля из ядра в кору. Исследованы зависимости этих величин от конфигураций магнитного поля. Показано, что существуют реалистичные модели магнитного поля в ядрах НЗ, позволяющие объяснять наблюдаемые свойства магнитаров.

Список литературы

1. Kaspi, V.M., Beloborodov, A.M. 2017, ARA&A, 55, 261;
2. Goldreich, P., Reisenegger, A. 1992, APJ, 395, 250;
3. Gusakov, M. E., Kantor, E. M., Ofengeim, D. D. 2017, PRD, 96, 103012.

Моделирование релятивистской плазмы методом Particle-in-Cell

Романский В. И.[1], Быков А. М.[1], Осипов С. М.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: romanskyvadim@gmail.com

Релятивистские течения в бесстолкновительной плазме – широко распространенное явление в астрофизике, встречающееся в джетах пульсаров, быстрых ударных волнах. Для их изучения используются различные методы математического моделирования, из которых один из самых точных — метод Particle-in-Cell, использующий непосредственно фундаментальные уравнения Максвелла. В данной работе проведено моделирование ударных волн в бесстолкновительной плазме с помощью разработанного нами неявного Particle-in-Cell кода на основе схемы, разработанной Lapenta et al.[1], а также с помощью кодов, разработанных другими авторами [2], и проведено сравнение результатов расчета различными численными схемами. Исследован вопрос о вовлечении в процесс ускорения на ударной волне частиц различных типов, в зависимости от параметров ударной волны.

Список литературы

1. Lapenta G., Brackbill J. U., Ricci P. «Kinetic approach to microscopic-macroscopic coupling in space and laboratory plasmas» Physics of Plasmas, Volume 13, 055904 (2006);
2. Sironi L., Spitkovsky A. «Particle acceleration in relativistic magnetized collisionless electron–ion shocks» Astrophysical Journal, 741 Issue 1, 39 (2011).

Проблемы прогнозирования огибающей солнечных циклов в терминах TSI методом аналогов

Скакун А. А.[1,2], Волобуев Д. М.[1]

[1]ГАО РАН
[2]ААНИИ

Эл. почта: a_skakun@mail.ru

Солнечное излучение является одним из важнейших факторов, влияющих на изменения климата Земли на различных временных и пространственных масштабах. По этой причине реконструкции и прогнозирование рядов полного потока излучения Солнца (TSI) — одна из самых актуальных на данный момент научных проблем. В данной работе мы рассмотрели три реконструкции TSI, основанные на данных о содержании космогенного изотопа ^{14}C в кольцах деревьев и солнечных пятнах (Vieira et al., 2011), содержании ^{10}Be в антарктических ледях кернах (Delaygue & Bard, 2010), а также по данным о солнечном потенциале, полученным с помощью модели на основе атмосферного радиоуглеродного ряда (Roth&Joos, 2013) и протестировали их предсказуемость модифицированным методом аналогов для одношагового прогноза огибающей (декадных средних). Мы получили, что качество прогноза ухудшается, если рассматривать композитный ряд, сконструированный по данным различных прокси. В частности, для реконструкции, восстановленной по радиоуглероду, метод аналогов не работает, если рассматривать ее вместе с разнородными реконструкциями TSI по нескольким индексам солнечной активности, и работает для реконструкций по космогенным изотопам. Таким образом, прогнозируемость рядов показывает нам наличие нелинейной детерминированной составляющей и является одним из критериев качества реконструкций.

Список литературы

1. Delaygue G., Bard E. An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium //Climate Dynamics. – 2011. – Т. 36. – №. 11-12. – С. 2201-2218;
2. Roth R., Joos F. A reconstruction of radiocarbon production and total solar irradiance from the Holocene ^{14}C and CO_2 records: implications of data and model uncertainties //Climate of the Past. – 2013. – Т. 9. – №. 4. – С. 1879;
3. Vieira L. E. A., Solanki S. K., Krivova N. A., and Usoskin I. Evolution of the solar irradiance during the Holocene // Astronomy and Astrophysics. – 2011. – Т. 531, P. A6.

Зависимость ренгеновской поляризации аккрецирующих черных дыр от заряда и момента вращения черной дыры

Белоновский А.[1], Гнедин Ю. Н.[2], Дымникова И. Г.[1]

[1]ФТИ
[2]ГАО РАН

Эл. почта: Leha.s92.92@gmail.com

В данной работе изучается влияние заряда и момента вращения черных дыр на поляризацию их излучения. Эти данные в дальнейшем будут использованы при анализе наблюдения рентгеновской поляризации аккрецирующих черных дыр. Радиус последней устойчивой орбиты уменьшается с ростом заряда и момента вращения, что приводит к увеличению магнитного поля в аккреционном диске. Магнитное поле, в свою очередь, влияет на поляризацию рентгеновского излучения. Увеличение значения магнитного поля приводит к уменьшению поляризации, по сравнению с классической теорией Соболева–Чандрасекара. В работе [1] представлены оценки величин магнитных полей для ряда активных галактических ядер. Эти оценки выполнены с использованием полученных из наблюдений величин степени линейной поляризации и позиционных углов в широких линиях Hα и в близлежащем непрерывном спектре. Найденные значения магнитных полей на расстояниях, где излучаются широкие линии, позволяют получить оценки величин магнитных полей в области первой от центра стабильной орбиты и на горизонте центральной чёрной дыры.

Список литературы

1. Силантьев Н.А., Гнедин Ю.Н. и др. Астрофизический бюллетень, 68(1):14–26, 2013;
2. Parthapratim Pradhan. arXiv: 1205.5656v3, 2016;
3. S. Chandrasekhar, The Mathematical Theory of Black holes, Oxford, Cl;arendon, 1983.

Открытие экзопланеты KPS-1b, а также обнаружение новых кандидатов в экзопланеты методом транзитной фотометрии. Тайминг экзопланеты TrES-5b. Возможное существование планеты TrES-5c

Соков Е. Н.[1,2]

[1]ГАО РАН
[2]САО РАН

Эл. почта: jenias06@gmail.com

В 2015 году был запущен проект совместного поиска экзопланет на основе мониторинга избранных площадок на небе в областях близких к Галактической плоскости. Данный проект включает в себя три основных направления: обнаружение, проверка и определение периода и подтверждение новых экзопланет по лучевым скоростям. Первая составляющая проекта: поисковой мониторинговый телескоп Celestron RASA с апертурой 279-мм. Расположен он в частной обсерватории Acton Sky Portal private observatory, Acton, MA, США, которой руководит Paul Benni (США). На базе регулярных фотометрических наблюдений избранных площадок на небе производится поиск транзитоподобных сигналов у попадающих в диапазон от 10 mag до 14 mag звёзд на основе пакета программ K-Pipe, разработанного Артёмом Бурдановым.

При обнаружении на основе проведённого мониторинга кандидатов в экзопланеты выполняется задача проверки повторяемости подобных транзитных сигналов, определения и уточнения периода их обращения вокруг родительской звезды. Данная задача выполняется при проведении международной наблюдательной кампании (проекта), организованной Евгением Соковым, для каждого из кандидатов.

Также все звёзды с обнаруженными кандидатами проходят проверку на наличие спутников звёздного происхождения. Данная проверка проводится на 6-метровом телескопе БТА (САО РАН) с использованием метода спекл-интерфрометрии.

После проведения проверки обнаруженных кандидатов и определения их периода ставится задача подтверждения данных кандидатов на основе анализа лучевых скоростей звезды с дальнейшим определением массы кандидата.

На данный момент в рамках данного российско-американского проекта по поиску экзопланет была открыта первая экзопланета KPS-1b с массой M = 1.09 +/- 0.05 MJup и периодом обращения вокруг родительской звезды P = 1.7 суток. Данная экзопланета была подтверждена на телескопе OHP с использованием спектрографа SOPHIE.

На сегодняшний момент обнаружено 5 уверенных кандидатов в экзопланеты (горячие Юпитеры). Для них уже хорошо определены периоды обращения вокруг родительских звёзд и определены оценки по продолжительности и глубине падения блеска при транзите. Для данных кандидатов ожидается подтверждение их на основе получения лучевых скоростей звёзд.

Также параллельно с данным проектом был запущен проект поиска экзопланет в Пулковской Обсерватории. Производится поиск транзитоподобных сигналов у звёзд,

которые имели более чем 3-часовой период фотометрических наблюдений, полученных во время длительной серии наблюдений.

Сейчас обнаружено 2 кандидата в экзопланеты с большим периодом обращения (возможно, 3 и более суток). Продолжительность транзита первого кандидата в экзопланеты составляет D ~ 3 часа, а глубина падения блеска Depth ~ 0.007 mag. Пока не удалось точно определить период для данного кандидата, но можно утверждать, что он превышает 2.5 дня. Второй кандидат в экзопланеты был обнаружен при мониторинге звезды, для которой недавно был обнаружен звёздный спутник. Продолжительность транзита оценивается, как D = 5.3 часа, глубина падения блеска Depth ~ 0.01 mag, а обнаруженный период кратен P = 0.91 суток. Для получения более точных оценок необходимы дополнительные фотометрические и спектральные наблюдения.

Изучение тайминга экзопланеты TrES-5b позволило предсказать возможное наличие в данной планетной системе экзопалнеты TrES-5c на основе проведённой фотометрической наблюдательной кампании и N-body моделирования.

Благодарности.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (грант 14-50-00043).

4963 Kanroku: Возможно, двойной астероид

Соков Е. Н.[1], Сокова И. А.[1]

[1]ГАО РАН

Эл. почта: jenias06@gmail.com

Астероид 4963 Kanroku является астероидом главного пояса. Он был обнаружен 18 Февраля 1977 года в обсерватории Kiso. Большая полуось данного астероида составляет a = 2.6 а.е., эксцентриситет e = 0.164 и период P = 4.19 лет. Диаметр астероида по последним оценкам составляет D = 11.306 ± 0.034 км, а период осевого вращения — P = 2.616 ± 0.001 часов.

На базе фотометрических наблюдений астероида 4963 Kanroku, проведённых в Астрономической Обсерватории DSFTA (Тоскана, Италия), и на основе анализа кривых блеска было обнаружено 2 периода. Первый период, равный P = 2.616 часов, соответствует периоду осевого вращения самого астероида, второй период P = 8.2017 ± 0.0021. Задача данной работа состояла в попытке понять причину появления такого периода. В работе мы представляем одно возможное объяснение существования второго периода в кривых блеска.

Для получения большего объёма наблюдательных данных, необходимых для полноценного анализа, была организована наблюдательная кампания по наблюдению за данным астероидом. Таким образом, было получено 5 дополнительных кривых блеска астероида. В сумме с предыдущими кривыми блеска, полученными в Италии, проведя ана-

лиз, нам удалось обнаружить повторяющиеся профили кривых блеска и сделать предположение о наличие прецессии оси вращения астероида 4963 Kanroku.

Было проведено моделирование вращения этого астероида с учётом прецессии, благодаря которому удалось получить модельные кривые, которые с большой точностью совпадают с данными, полученными на основе фотометрических наблюдений. Были определены наиболее подходящие параметры обнаруженной прецессии оси вращения астероида.

Также было выдвинуто предположение о наличии у данного астероида спутника, который может вызывать подобную прецессию. Таким образом, астероид 4963 может являться двойным, но для проверки этого предположения требуются дополнительные наблюдения.

Благодарности:

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 16-02-01183.

Диффузия ускоренных частиц и плазменные неустойчивости в астрофизических бесстолкновительных ударных волнах

Осипов С. М.[1], Быков А. М.[1], Кропотина Ю. А.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: osm2004@mail.ru

Бесстолкновительные ударные волны в астрофизической плазме могут ускоряют частицы до релятивистских энергий. Ускорение частиц происходит по механизму Ферми первого порядка при диффузии частиц в турбулентных магнитных полях вблизи фронта ударной волны и много кратном пересечении ими ударного фронта. При этом значительная доля кинетической энергии ударной волны конвертируется в энергию ускоренных частиц. В процессе ускорения формируется анизотропное распределение ускоренных частиц, обладающее градиентом давления и током относительно фоновой плазмы в предфронте ударной волны. Наличие анизотропии функции распределения ускоренных частиц в предфронте ударной волны приводит к развитию ряда плазменных неустойчивостей, которые усиливают турбулентные флуктуации магнитных полей. Турбулентные магнитные поля определяют диффузию частиц вблизи ударной волны и соответственно определяют эффективность процесс ускорения частиц. В настоящее время в литературе часто рассматривают по отдельности акустическую неустойчивость [1-2] и коротковолновую неустойчивость [3-4]. Предполагается, что акустическая неустойчивость связана с наличием градиента давления ускоренных частиц в предфронте ударной волны и возмущением данного давления, а коротковолновая неустойчивость связана с током ускоренных частиц относительно фоновых в предфронте. Мы развиваем аналитическую кинетическую модель, описывающую поведение плазмы в предфронте бесстокновительной ударной волны, которая позволяет нам провести анализ усиливающихся мод сов-

местно по механизмам Друри и Белла, не используя ряд приближений, не позволявших сделать это ранее.

Список литературы

1. Drury L.O., Reaction effects in diffusive shock acceleration, Adv. Space Res., 4, 185-191, 1984;
2. Chalov S.V., Instability of the structure of strong oblique MHD cosmic-ray shocks, Astrophys. Space Sci., 148, 175–187, 1988;
3. Bell A.R., Turbulent amplification of magnetic field and diffusive shock acceleration of cosmic rays, Mon. Not. R. Astron. Soc., 353, 550–558, 2004;
4. Bell A.R., The interaction of cosmic rays and magnetized plasma, Mon. Not. R. Astron. Soc., 358, 181–187, 2005.

АТОМНАЯ ФИЗИКА И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Nuclear modification factors of Ks and omega mesons in Cu+Au collisions at 200 GeV

Zharko S. V.[1], Berdnikov A. Ya.[1], Berdnikov Ya. A.[1], Kotov D. O.[1], Radzevich P. V.[1]

[1]SPbPU, Russia

Эл. почта: zharkosergey94@gmail.com

Strongly interacting quark-gluon plasma (sQGP) [1] is a deconfined state of nuclear matter, which has color-charged quarks and gluons (partons) as its degrees of freedom. Experimentally sQPG is produced in central collisions of heavy relativistic nuclei. First experimental evidences of sQGP formation were obtained in experiments [2-5] of Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at BNL, USA.

Measurements of hadron production in heavy ion collision serve as a probe of sQGP medium effects. Jet quenching [6] is one of the evidences for sQGP formation and is presented by suppression of the hadron yields at high transverse momentum (p_T>5 GeV/c). The effect of jet quenching is usually explained by energy loss of high energy partons in the sQGP medium.

Nuclear modification factor (R_{AA}) is a practical observable for the medium effects, which is calculated as a ratio of the particle yields measured in heavy ion (A+A) collisions and the same particle yields measured in p+p collisions at the same collision energy and scaled by the number of binary inelastic nucleon-nucleon collisions. Measurements of different hadron R_{AA} provide a systematic study of sQGP production depending from the hadron properties (mass, flavor, spin etc.). K_S and omega mesons are pseudoscalar and vector mesons respectively, thus measurement of their nuclear modification factors can provide information on the dependence of parton energy loss on spin of produced particles.

Measurements of particles production in different heavy ion systems provide information on the dependence of sQGP on the initial state conditions. For example, Cu+Au collisions at 200 GeV is the unique heavy ion collision system, which has an asymmetric nuclear overlap region when compared to symmetric systems such as Au+Au or Cu+Cu.

In this talk we present results on measurement of K_S and omega mesons production spectra and nuclear modification factors in Cu+Au collisions at 200 GeV with respect to particle transverse momentum and collision centrality.

We acknowledge support from Russian Ministry of Education and Science, state assignment 3.1498.2017/4.6.

Список литературы

1. Shuryak E V 1980 Phys. Rept. 61 71;
2. Arsene I et al 2005 Nucl. Phys. A 757 1-27;
3. Back B et al 2005 Nucl. Phys. A 757 28-101;
4. Adams J et al 2005 Nucl. Phys. A 757 102-83;
5. Adcox K et al 2005 Nucl. Phys. A 757 184-283;
6. Arnold P B et al 2002 JHEP 206 30.

Nuclear modification factors of π^0 and η mesons in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=192 GeV

Радзевич П. В.[1], Бердников А. Я.[1], Бердников Я. А.[1], Котов Д. О.[1], Жарко С. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: radzevichp@gmail.com

Extensive study of heavy ion collisions at RHIC has resulted in discovery of a strongly coupled Quark Gluon Plasma (sQGP) — state of nuclear matter with partonic degrees of freedom under extreme conditions of temperature. Since then, the main effort of RHIC experiments was directed towards detailed study of the new state of matter using more differential and precise measurements.

Hard scattered partons loose significant part of their energy traversing the medium produced in heavy ion collisions resulting in suppressed production of high-p_T hadrons or jet quenching. As a result, high-p_T hadrons and jets are a sensitive probe of opacity of the produced medium. The jet quenching effect in nuclear collisions is quantified with the nuclear modification factor, which is a ratio of the yields measured for the same particle in heavy ion and p+p collisions and scaled by the corresponding number of inelastic nucleon-nucleon collisions.

Light neutral mesons (pi0, eta, K_s, omega) can be measured with fine precision at high transverse momenta, which presents a good opportunity for hard probe measurements. The system of U+U collisions is an opportunity to research system with highest energy density in central collisions accessible at RHIC so far. Study of differential transverse momentum spectra and nuclear modification factors of light mesons in U+U collisions will help to better discriminate between input parameters of various theoretical models and better understand mechanisms of partonic energy loss in the quark-gluon medium.

This talk will present differential transverse momentum spectra and nuclear modification factors of pi0 and eta mesons in U+U collisions at 192 GeV measured in a wide transverse momentum range and different centrality intervals with PHENIX experiment at RHIC. Yields of pi0 and eta mesons measured in U+U collisions are similary suppressed. Also, they show similar suppression pattern with yields measured in Au+Au collisions at the same collision energy and large numbers of participant. When the number of participants is small (i.e. periph-

eral collisions) pi0 and eta mesons are stronger suppressed in U+U collisions then in Au+Au. Ratios of pi0 and eta mesons yields do not depend on collision centrality and show similar transverse momentum dependence as previous measurements in p+A and A+A collisions with PHENIX experiment at RHIC.

We acknowledge support from Russian Ministry of Education and Science, state assignment 3.1498.2017/4.6.

Phi meson measurements in Cu+Au collisions at 200 GeV and in U+U collisions at 192 GeV

Митранков Ю. М.[1], Бердников Я. А.[1], Бердников А. Я.[1], Котов Д. О.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: mitrankovy@gmail.com

A series of important discoveries in 2005 allowed all the collaborations at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) to make a statement about the detection of quark-gluon plasma (QGP), representing an ideal liquid with parton degrees of freedom [1-4]. One of the most important discoveries was the effect of jet quenching, which consists in suppressing the yields of particles with large transverse momentum in A+A interactions [5]. This effect is explained on the assumption that the hard scattered partons, before being fragmented into hadrons, lose some of their energy in a dense nuclear matter formed in the final state.

So far, jet quenching was experimentally observed only in central collisions of symmetric systems (Cu+Cu, Au+Au at RHIC; Pb+Pb at the LHC). In 2012 RHIC for the first time delivered asymmetric collisions of heavy ions, Cu+Au at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV and interactions of U+U at $\sqrt{s_{NN}}$ = 192 GeV.

In central Cu+Au collision, the smaller nucleus is fully enveloped in the larger one thus reducing the contribution of nucleon-nucleon collisions in the low-density nuclear corona region. In non-central collisions, such interactions produce asymmetric nuclear overlap region. These makes asymmetric collisions of heavy nuclei distinct and important for systematic study of the parton energy loss, they can help to better constrain input parameters of different theoretical models and better understand parton energy loss mechanism. Additional insight into the nature of parton energy loss can be gained from U+U interactions since they provide the highest available energy density at RHIC.

The phi meson has a number of features that make it a valuable probe of the medium created in high energy heavy-ion collisions. As the phi is composed solely of s and anti-s quarks, its production is sensitive to the abundance of strange quarks in the system. Enhanced production of the phi meson in heavy-ion collisions was proposed as a signature of QGP formation [6]. The phi meson peak in the mass spectrum is well separated from the other resonances and has a narrow decay width as well, thus providing an experimentally clean signal.

In this report we will present latest results on the phi meson production in Cu+Au at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV and U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 192 GeV using the PHENIX detector at the RHIC. This report presents invariant transverse momentum spectra and nuclear modification factors of phi meson. The results are compared to the ones obtained in symmetric systems (Cu+Cu, Au+Au) as well as to other light mesons (pi0, eta) [7].

We acknowledge support from Russian Ministry of Education and Science, state assignment 3.1498.2017/4.6.

Список литературы

1. Arsene I et al 2005 Nucl. Phys. A 757 1-27;
2. Back B et al 2005 Nucl. Phys. A 757 28-101;
3. Adams J et al 2005 Nucl. Phys. A 757 102-83;
4. Adcox K et al 2005 Nucl. Phys. A 757 184-283;
5. Arnold P B et al 2002 JHEP 206 30;
6. Shor A 1985 Phys. Rev. Lett. 54 1122–1125;
7. Zharko S V et al 2017 J. Phys. Conf. Ser. 929 1, 27.

Transportation of exotic fission products targeted for the goals of astrophysical r-process

Simonovski Dimitar[1], Chenmarev S. V. [2]

[1]SPbU, Russia
[2]Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of NRC, Russia

Эл. почта: simonovski.dimitar@yandex.ru

The consensus exists nowadays that a significant part of heavy nuclides are produced in the astrophysical process of rapid neutron capture. The nuclear path of this process was evaluated only theoretically, because the nuclear masses needed for this simulation are still unknown. In order to produce these very exotic nuclides the project PITRAP (Petersburg Institute TRAP) was elaborated at the PNPI in Gatchina [1]. Being installed at the beams of products of the high-flux PIK-reactor, the ion traps can be used in the on-line regime for direct high precision mass measurements of exotic nuclides, those that take part in the r-process. Meanwhile the critical point for implementation of tasks in the project is transportation of exotic nuclides from the reactor interior towards the mass measurement system (Penning trap). One of the promising approaches which can be used is the fast transportation of fission products by a jet system.

The gas-jet transportation system has already been successfully implemented, tested and used on the facilities on the TRIGA research reactor in Mainz (Germany). Using this transportation method, relatively high transport efficiency has been repeatedly experimentally measured, all the while simultaneously achieving short transport times. Such experimental conditions are indeed crucial for the survival of the short lived exotic nuclei during their transportation process from their moment of birth in the target chamber till the moment of their detection

in the measurement setup. Another extremely crucial parameter, which determines the survival of the traveling fission products, is their production rate, which is directly proportional to the fissile target mass used and the neutron flux that irradiates it. On the PIK-reactor an improvement in those the experimental conditions are planned regarding the ones on the TRIGA-reactor in Mainz, according to which around thousand times more massive uranium target is going to be used and around hundred times higher neutron flux. Under such experimental conditions one would approximately expect a hundred thousand times higher production rate of fission products to be achieved, which in its own accord sounds extremely promising in the future successful detection of unstudied short-lived exotic nuclei.

In order to successfully implement the gas-jet transport system in the newly planned experimental conditions in the facilities on the PIK-reactor for the purpose of mass measurement of exotic nuclei, a study has been done on the gas-jet transport method based on the already operating one on the TRIGA-reactor in Mainz. The study includes experimental measurements of the transport parameters of the gas-jet system and their subsequent mathematical modeling, which makes the process of optimization, transference and implementation of the gas-jet method possible for the new experimental conditions presented by the PITRAP project. As a result from our theoretical modeling of the gas-jet transport process a formula for the transport time has been derived, which was in agreement with the experimentally obtained results for the fission products transport time at the TRIGA-reactor facility [2]. As a result from the optimization of the gas-jet method, which involved all noble gases as candidates for the gas-jet transport method including nitrogen, which is already used in the TRIGATRAP project, an improvement is suggested by using helium as a carrier gas, because of its much shorter transport times and fewer experimental constraints implied by using it. By implementing the previously elaborated improvement, by using the helium as a carrier gas, and taking into account the planned operating conditions on the PIK-reactor a prediction has been made for the expected survival of yet uninvestigated short-lived exotic nuclei after the transport process, which for the first time would be available to be put under experimental observation and subsequent experimental mass measurement.

Список литературы

1. Yu.I. Gusev et al., Penning Ion Traps for High-Precision Measurements of the Mass of Neutron-Excess Nuclei in the Pik Reactor, Atomic Energy (in Russia), 118, 334-340, 2015;
2. D. Simonovski et al., Gas transport method for delivering the fission products from the target located near the reactor core, Atomic Energy (submitted).

Interaction between spin polarized alkali atoms

Картошкин В. А.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: victor.kart@mail.ioffe.ru

Collisions of alkali-metal atoms in the ground state with the electron spin S = 1/2 are accompanied by exchange of electron coordinates between the colliding particles, which leads to the polarization transfer between them (i.e., to the well-known phenomenon of spin exchange). In addition, along with the polarization transfer from one partner to another, the magnetic resonance lines of colliding atoms are broadened and shifted in spin-exchange collisions. The last two processes depend, in particular, on the complex spin-exchange cross section. The real part of the cross section determines the so-called “spin-exchange cross section,” which is responsible for broadening of magnetic resonance lines, while the imaginary part—the shift cross section—governs the frequency shift of magnetic resonance. The spin-exchange broadening of a magnetic resonance line and its shift significantly affect the precision of such quantum electronics devices as quantum frequency standards and magnetometers.

In order to describe the spin-exchange process we have to know complex spin-exchange cross sections. Complex spin-exchange cross sections are calculated on the basis of the data on the singlet ($X^1\sum^+$) and triplet ($a^3\sum^+$) potentials describing the interaction alkali-metal atoms in the ground state. The cross sections calculated in this study are compared with the cross-section data obtained earlier with the model interaction potentials. The cross-section values allow one to calculate the processes of polarization transfer and the relaxation times, as well as the magnetic resonance frequency shifts caused by the Rb–Rb, Cs-Cs and Cs-Rb spin-exchange collisions.

Collisions of alkali-metal atoms Cs, Rb, K, Na in the ground state are considered in the energy interval of 10^{-4}–10^{-2} au. Complex cross sections of the spin exchange, which allow one to calculate the processes of polarization transfer and the relaxation times, as well as the magnetic resonance frequency shifts caused by spin exchange collisions, are obtained.

Magnetic resonance frequency shifts caused by spin-exchange collisions between ^{87}Rb and ^{133}Cs atoms are calculated, and temperature dependences of magnetic resonance frequency shifts are drawn for two hyperfine states (F = 1, 2) of ^{87}Rb and (F=3,4) of ^{133}Cs atoms. The obtained dependences are compared with experimental data.

The mechanism of cumulative proton production in the collision of C^{12} and Be^{8} nuclei at the energies of 0.6, 0.95 and 2 GeV/nucleon

Ларионова Д. М.[1], Ларионова М. М.[1], Борисов В. С.[1], Митранков Ю. М.[1], Соловьев В. Н.[1], Бердников Я. А.[1], Бердников А. Я.[1], Котов Д. О.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: dlar@bk.ru

Since the discovery of the cumulative particles in the seventies [1], the production mechanism of such particles remains open to this day.

By the cumulative reaction in this report, we mean the production of particles in the kinematic region, which is forbidden by the energy-momentum conservation laws for free nucleon-nucleon collisions (here by "free" we mean collisions of nucleons in a vacuum).

At present most common mechanism of cumulative particle, production is the mechanism of quark cluster fragmentation [2].

This mechanism was analyzed in [3] for the inclusive proton production in the C^{12} and Be^{8} nuclei collision at kinetic energies of 0.6, 0.95 and 2.0 GeV/nucleon in the Be^{8} rest frame. Using framework of quark cluster fragmentation, we obtained invariant cross sections for cumulative proton production, and also the probability that six-quark and nine-quark clusters exist in the nucleus. The results of [3] are in good agreement with the data obtained by the FRAGM experiment [4, 5] and theoretical predictions [6].

In this report we present the results of Monte Carlo simulation which show that at energies of 0.6, 0.95 and 2.0 GeV/nucleon experimental data [4, 5] can be explained by the alternative mechanism associated with the intermediate processes of multiple scattering and the formation of nucleon resonances [7]. It is concluded that at these energies the explanation of cumulative proton production in these reactions does not require the introduction of multiquark clusters.

In this report, we present invariant cross sections of cumulative proton production. The results of the simulation performed in this work and experimental data are compared [4, 5].

We acknowledge support from Russian Ministry of Education and Science, state assignment 3.1498.2017/4.6.

Список литературы

1. A. M. Baldin, Yad. Phys., т. 18, № 79, 1973;
2. A.V. Efremov, A.B. Kaidalov, V.T. Kim, G.I. Lukasov, N.V. Slavin, Yad. Phys, № E2-87-355, 1987;
3. Abramov B.M. et al., arXiv, 2013;
4. B.M. Abramov, P.N. Alexeev, Yu.A. Borodin et al., J. Phys.:Conf. Ser., 381, 012037, 2012;
5. B.M. Abramov, P.N. Alexeev, Yu.A. Borodin et al., Bull. Rus. Acad. Sci., Ser. Phys,75,500, 2011;
6. V.V. Burov, V.K. Lukyanov, A.I. Titov, Phys. Lett. B., 67, 46, 1977;
7. Bierlich C. et al., arXiv:1607.04434, 2-48, 2016.

Отношение множественностей частиц в коалесцентной модели коррелированных кварков

Мосолова Е. О.[1], Борисов В. С.[1], Бердников Я. А.[1], Бердников А. Я.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: kate@redglue.ru

Средняя множественность частиц, рождаемых при столкновениях адронов с адронами и ядрами, ядер с ядрами при высоких энергиях является одной из основных характеристик для изучения как механизма образования частиц (адронизации), так и свойств ядерной материи, которая может образовываться при таких столкновениях (например, кварк-глюонной плазмы).

Первыми моделями, претендующими на удовлетворительное описание множественного рождения частиц, являются статистическая модель Ферми [1] и гидродинамическая модель Ландау [2].

Обе выше упомянутые модели предсказывают степенную зависимость количества вторичных частиц от энергии. Однако, экспериментальные данные с LHC однозначно аппроксимируются логарифмической зависимостью [3]. Отсюда следует необходимость всестороннего экспериментального и теоретического исследования особенностей рождения частиц при ультрарелятивистских энергиях.

Эксперименты по столкновению пучков частиц можно условно разделить три большие группы: протон-протонные, протон-ядерные и ядро-ядерные.

В протон-протонных столкновениях рождается большое количество вторичных частиц.

В ядро-ядерных столкновениях количество вторичных частиц на одно парное нуклон-нуклонное столкновение ниже [4]. Протон-ядерные столкновения используются как вспомогательные, чтобы различить источник эффектов, наблюдаемых в столкновениях одинаковых пучков.

В работах [5, 6] в рамках КММК были рассчитаны отношения выходов частиц в имеющихся в то время экспериментах. В последующих публикациях [7] был учтен вклад глюонов и резонансов.

В последние годы появились новые экспериментальные данные по измерению отношений выходов частиц, например, [8].

В настоящей работе эти отношения множественностей рождения адронов, в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов, рассчитаны на основе Коалесцентной модели коррелированных кварков (КМКК) [5, 6] и с использованием последней версии Pythia 8.230, расширенной на протон-ядерные и ядро-ядерные столкновения [9].

В КМКК множественности рождения адронов зависят от 6 феноменологических параметров: температуры; химического потенциала легких кварков; константы, описывающей вклад компоненты странного кварка и антикварка в структуру псевдоскалярных и векторных мезонов; и три константы, связанные с пространственными объемами рождения мезонов, барионов и антибарионов.

В работе представлены рассчитанные в КММК отношения множественностей заряженных пионов, антипротона к отрицательно заряженному пиону и отношение протона к положительно заряженному пиону. Приведены феноменологические параметры расчета.

Приводятся также результаты предсказаний, сделанных на основе подходов, развитых в Pythia 8.230.

Проведено сравнение с современными экспериментальными данными.

Данные исследования были проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Грант 3.1498.2017/4.6.

Список литературы

1. E. Fermi, Progress of Theoretical Physics, Volume 5, Issue 4, Pages 570–583, 1 July 1950;
2. Ландау Л. Д. Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 17. 1953;
3. Ajay Kumar Dash and Bedangadas Mohanty, Extrapolation of Multiplicity distribution in p+p(\bar(p)) collisions to LHC energies, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Volume 37, Number 2, 2010;
4. K. Adcox, S.S. Adler, N.N. Ajitanand, et al., Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at sqrt(S_NN) = 130GeV, Phys. rev. Lett., 88 022301– 022307, 2001;
5. A. Ya. Berdnikov, Ya. A. Berdnikov et. al, On the hadron production from the quark–gluon plasma phase in ultra–relativistic heavy–ion collisions, FIZIKA B 12, 3, 235-256, 2003;
6. A. Ya. Berdnikov, Ya. A. Berdnikov et. al., On the K±–meson production from the quark–gluon plasma phase in ultra–relativistic heavy–ion collisions, acta physica slovaca vol. 52 No. 3, 143 – 160, 1999;
7. Е.М. Маркина, А.Я. Бердников, Вклад глюонов в отношения средних множественностей адронов, рожденных из кварк-гпюонной плазмы в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов, XXXIV неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов: 28 ноября — 3 декабря 2005 г.;
8. B. I. Abelev et. al. Systematic Measurements of Identified Particle Spectra in pp, d+Au and Au+Au Collisions from STAR, Phys. Rev. C 79, 034909, 2009;
9. http://home.thep.lu.se/~torbjorn/pythia82html/UpdateHistory.html.

Вычисление поправки Бора-Вайсскопфа для постоянной сверхтонкой структуры

Просняк С. Д.[1,2], Скрипников Л. В.[1,2]

[1]СПбГУ
[2]ПИЯФ

Эл. почта: prosnyak.sergey@yandex.ru

Существуют различные способы проверки квантовой электродинамики. Одним из них является измерение радиационных поправок к сверхтонкой структуре многозарядных ионов. Однако, для их извлечения из экспериментальных данных необходимо учитывать поправки на структуру ядра. Первая из них, вызванная конечным распределением заряда ядра, получила название поправки Брейта-Розенталя, а вторая, связанная с распределением магнитного момента (т.е. отличие от модели точечного диполя) — поправки Бора-Вайсскопфа. Подробному рассмотрению последней и была посвящена проведённая работа.

Для изучения был выбран атом нейтрального таллия, так как для водороподобного таллия ранее уже были получены хорошие результаты. Основным усложнением по сравнению с водороподобным таллием в случае нейтрального атома является электронная корреляция, достаточно точный учет которой и был произведен в данной работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента Российской Федерации МК-2230.2018.2

Список литературы

1. V.M. Shabaev J. Phys. B 21 5825-5832 (1994);
2. E.A. Konovalova, M.G. Kozlov, Yu.A. Demidov, A.E. Barzakh arXiv:1703.10048 [physics.atom-ph] (2017).

Теплофизические и электрофизические свойства монокристаллического вольфрама

Солнцева Екатерина[1], Таубин М. Л.[2], Чесноков Д. А.[1]

[1]НИИ НПО «Луч»
[2]МИФИ

Эл. почта: kate.grigoryants@gmail.com

В современной науке и технике существует острая потребность в материалах, способных надежно работать при температурах до 2500°С. Тугоплавкие металлы, такие как Вольфрам, Молибден, Ниобий, а также сплавы на их основе рассматериваются в качестве перспективных как для ядерных установок (термоэмиссионные и термоэлектрические реакторы), термоядерного реактора ИТЕР, катодов мощных рентгеновских трубок.

Монокристаллы металлов высокой чистоты обладают рядом уникальных свойств, которые отсутствуют у соответствующих поликристаллических материалов. Пластичность, высокая чистота по примесям внедрения, вакуумная плотность и стабильность структуры вплоть до температуры плавления, устойчивость к воздействию паров щелочных металлов, возможность дополнительного управления свойствами из-за зависимости их от ориентации и плотности дефектов — таковы основные преимущества монокристаллов. Знание теплофизических свойств материалов необходимо при проектировании и обосновании работы сложных технических объектов, таких как ядерные реакторы. Электрофизические свойства являются определяющими при выборе материала катодов рентгеновских труб, электродов термоэмиссионных реакторов-преобразователей. Однако, многие свойства рассматриваемых материалов или совсем не изучены, или изучены недостаточно. В данной статье описаны разработанные методики и получены сравнительные экспериментальные результатов по тепло- и электрофизическим свойствам монокристалла W-4%Ta при высоких температурах (до 2500 С).

Observation of Polarized Alkali Atoms in Experiments on Optical Orientation in a He–Rb and He-Cs Mixture under Conditions of a Pulsed Gas Discharge

Dovator Nicolai[1], Dmitriev S. P.[1], Kartoshkin V. A.[1], Klementiev G. V.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: nicolai.dovator@mail.ioffe.ru

It has been demonstrated that optical pumping of alkali atoms (rubidium and cesium) results to a highly efficient indirect optical orientation of metastable He (2^3S_1) atoms. However, in an attempt to perform the inverse experiment (obtain spin-polarization of alkali atoms upon optical pumping of metastable helium atoms) the result was quite unexpected: the magnetic resonance signal of Cs or Rb atoms was very weak (several hundred times weaker compared to conventional optical pumping of helium in the presence of cesium (rubidium)).

In this paper we discuss the indirect orientation of Cs atoms, which was observed for the first time in our early works in a helium–cesium plasma discharge with use of an indirect registration method. We propose an explanation for the unusually small ratio of the magnetic resonance signals from Cs and metastable He atoms under condition of optical orientation of He atoms.

Except of Cs atoms we are the first to have observed magnetic resonance signals from atoms of ^{85}Rb and ^{87}Rb isotopes when using the indirect optical orientation in conditions of helium–rubidium gas discharge plasma. An anomalously small ratio of magnetic resonance signals from isotopes of rubidium and metastable helium upon optical orientation of ^{4}He atoms has been detected.

The experimental results have been considered theoretically, and an explanation of the observed anomaly in the signals is presented.

It is shown that the anomaly in the amplitude ratios of the observed MR signals can be explained by the unidirectional action of three different factors (the presence of a large nuclear spin of alkali atoms, depolarization of alkali atoms between collisions, and spin exchange between atoms of rubidium isotopes (for the He-Rb system)). The influence of the spin exchange between atoms of rubidium isotopes is what constitutes the fundamental difference between the situation under consideration and the case of Cs–He collisions.

Спектрометрический метод измерения поглощения света листьями растений

Кулешова Т. Э.[1], Середин И. С.[2], Щеглов С. А.[3], Блашенков М. Н.[3], Чумаченко А. В.[3,4], Феофанов С. В.[2], Кирадиев В. К.[2], Одноблюдов М. А.[3,4]

[1]ФТИ
[2]ООО «О2 Световые системы»
[3]ИТМО
[4]СПбПУ

Эл. почта: www.piter.ru@bk.ru

Одну из ключевых ролей в жизнедеятельности растений играет свет, при поглощении которого в растительных организмах осуществляется реакция фотосинтеза – получения органических веществ. Преобразование света происходит в листьях растений за счет работы светочувствительных пигментов, к основным из них относятся хлорофилл a и b. Однако за счет присутствия в клетках дополнительных пигментов (каротиноидов, антоцианов и т.д.) область поглощения видимого диапазона излучения расширяется. Также уширение спектра поглощения листьев связано с рассеянием Ми на таких структурах как митохондрии, рибосомы, ядра, крахмальные зерна и другие пластиды [1]. Таким образом, спектры поглощения листьев передают информацию о структуре и биохимических составляющих внутри растительных тканей и могут быть непосредственно связаны с физиологическими процессами растений и, следовательно, с производством биомассы, прогнозами урожая и здоровьем растений [2].

Цель данной работы заключалась в разработке неповреждающего метода регистрации спектров поглощения листьев растений, потенциально связанных с физиологическим состоянием растений и фотосинтетическим аппаратом и коррелирующих с условиями роста – освещением, влажностью, температурой и т.д.

За основу была взята система измерения оптических свойств тканей с помощью двух интегрирующих сфер [3] – исследуемый образец помещается между сферами, одна из которых (ИС1) регистрирует отраженный свет, а другая (ИС2) прошедший. Интегрирующие сферы с внутренним диаметром 50 мм были сконструированы в СПбПУ и выполнены на 3D принтере из ABC-пластика. Окраска внутренней поверхности сфер произведена в соответствии с приложением Д ГОСТ Р 55702—2013, оптические свойства оттестированы по сравнению с эталонной поверхностью сферы EVERFINE. В качестве источника излучения в схеме использовали специализированный под фотосинтетически

активный диапазон светодиодный модуль разработки российской инжиниринговой компании «О2 Световые системы» с пятью каналами с максимумами в диапазоне длин волн: 650-670 нм, 720-740 нм, 440-460 нм, 415-435 нм и белый свет 4500К, и с управляемой драйвером интенсивностью лучистого потока каждого канала от 0 до 255 ед, что позволяет направлено изучать действие нужной области спектра и энергии излучения на объект. Свет от источника собирали с помощью плоско-выпуклой линзы и через коллиматор 74-UV (Ocean optics) с расходимостью пучка < 2° заводили в интегрирующую сферу ИС1, попадая на область образца диаметром 10 мм. Детектором служил оптический оптоволоконный ПЗС-спектрометр CCS200 (Thorlabs) с диапазоном регистрации спектра 200-1000 нм и шагом длины волны <2 нм, соединенный с интегрирующими сферами с помощью оптоволокно BFL200HS02 (Thorlabs) диаметром 200 μм. Коэффициент поглощения A(λ) рассчитывали по формуле A(λ) =1- R(λ) - T(λ), где R(λ) – коэффициент отражения образца, T(λ) – коэффициент пропускания.

Было проведено биологическое тестирование разработанной системы – сняты спектры поглощения листьев листового салата сорта «Афицион». Отличия в спектрах поглощения живых листьев и их свежих срезов не зафиксировано, однако через некоторое время поглощение срезанного листа увеличивается, что, видимо, связано с его нагревом. Также составлена «карта поглощения» поверхности листовой пластины салата от верхушки до основания.

Таким образом, одним из вариантов фитомониторинга может являться анализ спектра поглощения листа растения. Использованный спектрометрический метод позволит получать информацию о поглощении излучения от источника освещения и связанных с этим фотосинтетических реакциях. Изменение оптических свойств листьев может являться чувствительным показателем физиологического состояния растения и характеризовать его потребности, особенно в отношении фотосинтетически активной радиации.

Список литературы

1. Gates D. M., Keegan H. J., Schleter J. C., Weidner V. R. Spectral properties of plants. Applied optics. 1965. V. 4. № 1. P. 11-20;
2. Mõttus M., Hovi A., Rautiainen M. Theoretical algorithm and application of a double-integrating sphere system for measuring leaf transmittance and reflectance spectra. Applied optics. 2017. V. 56. № 3. P. 563-571;
3. Pickering J. W., Prahl S. A., Van Wieringen N., Beek J. F., Sterenborg H. J., Van Gemert M. J. Double-integrating-sphere system for measuring the optical properties of tissue // Applied optics. 1993. V. 32. №. 4. P. 399-410.

Исследование изменений внутриклеточной морфологии при фотодинамическом воздействии методом голографической томографии

Рогова Д. А.[1,2], Белашов А. В.[2], Беляева Т. Н.[3], Васютинский О. С.[2], Корнилова Е. С.[3], Семенова И. В.[2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ
[3]ИНЦ РАН

Эл. почта: daryarogova7@gmail.com

Исследование реакции живых клеток *in vitro* на фотодинамическое воздействие (ФДВ), сопровождающееся генерацией в них активных форм кислорода, является актуальной задачей, поскольку фотодинамическая терапия находит все более широкое применение для лечения онкологических заболеваний. Основными методами, использующимися для исследования клеток *in vitro*, являются световая и электронная микроскопия, проточная цитометрия, флуоресцентная микроскопия, иммуногистохимия, иммуноферментный анализ, электрофорез и TUNEL-метод [1]. В последнее время все большее применение получают методы цифровой голографической микроскопии [2]. Наиболее полную информацию дает комбинирование различных методов исследования. Всесторонние исследования механизмов реакции клеток на ФДВ могут дать важную информацию для оценки эффективности лечения [3]. В большинстве научных работ на данный момент наиболее часто регистрируемым откликом клеток на ФДВ является некроз — гибель клетки, которая сопровождается развитием альтерации окружающих клеток и протеканием воспалительных процессов [3]. Однако процессы аутофагии и апоптоза, индуцированные генерацией активных форм кислорода во внутриклеточных структурах, также наблюдались в ряде работ [3, 4].

В рамках данной работы было проведено исследование реакции клеток линий карциномы шейки матки HeLa и карциномы легкого A549 на ФДВ с использованием фотосенсибилизатора Радахлорин. Образцы культивировались в чашках Петри в среде DMEM, содержащей 10% сыворотки крови плодов коровы и 1% пенициллина/стрептомицина в атмосфере 5% CO_2 при 37 °C. Перед проведением экспериментов клетки выдерживались в растворе, содержащем фотосенсибилизатор в концентрации 5 мг/мл, в течение 4 часов, при этом происходило его проникновение внутрь клеток. Затем раствор заменялся на чистую культуральную среду. После этого клетки облучали лазерным излучением на длине волны 660 нм, соответствующей максимуму полосы поглощения фотосенсибилизатора, что приводило к образованию активных форм кислорода внутри клеток и последующей гибели клеток.

Для изучения морфологических изменений в клетках, происходящих в процессе их гибели, использовался оптический микроскоп, основанный на принципе голографической томографии (3D Cell Explorer, Nanolive, Switzerland). Благодаря сочетанию голографической микроскопии, восстанавливающей изменения формы волнового фронта при его прохождении через исследуемый образец, и вращению зондирующего пучка, удается

произвести восстановление трехмерного распределения показателя преломления во внутриклеточных структурах. Как известно, данные о показателе преломления клеток могут быть использованы для оценки их состояния и диагностики заболеваний [2, 5]. В работе методом голографической томографии исследовались характеристики клеток в исходном состоянии и после ФДВ. Производилась сегментация нескольких десятков живых клеток из каждой группы, и определялись их параметры: объем, сухая масса, средняя высота, площадь поверхности мембраны, пространственное распределение показателя преломления. Наблюдение каждой группы клеток проводилось после завершения ФДВ в течение 3 часов с интервалом в 30 секунд. Анализ полученных данных показал, что при малых дозах облучения в клетках наблюдаются морфологические изменения, типичные для апоптоза — блеббинг и округление клеток. При высоких дозах облучения проявляются изменения, характеризующие некроз — происходит разрыв мембраны и вытекание содержимого клетки наружу. Также предположительно наблюдался механизм аутофагии — процесс, при котором внутренние компоненты клетки доставляются внутрь её лизосом или вакуолей и подвергаются в них деградации, что на томографическом изображении проявляется в виде образования пустот внутри клетки.

Список литературы

1. G. Bao, S. Suresh. Cell and molecular mechanics of biological materials. Nature Materials, 2, 715–725, 2003;
2. P. Y. Liu et al. Cell refractive index for cell biology and disease diagnosis: past, present and future. Lab Chip, 16, 4, 634-644, 2016;
3. В.Н. Манских. Пути гибели клетки и их биологическое значение. Цитология, 49, 11, 909-913, 2007;
4. Т.Ф. Сергеева, М.В. Ширманова, Е.В. Загайнова, К.А. Лукьян. A. Ali, Y. Abouleila, S. Amer, R. Furushima, S. Emara. Quantitative Live Single-cell Mass Spectrometry with Spatial Evaluation by Three-Dimensional Holographic and Tomographic Laser Microscopy. Analytical Sciences, 32, 125, 2016.ов. Современные методы исследования апоптотической гибели клеток (обзор). Современные технологии в медицине, 7, 3, 172-182, 2015;
5. A. Ali, Y. Abouleila, S. Amer, R. Furushima, S. Emara. Quantitative Live Single-cell Mass Spectrometry with Spatial Evaluation by Three-Dimensional Holographic and Tomographic Laser Microscopy. Analytical Sciences, 32, 125, 2016.

Study the effect of temperature on the physiological properties of ascorbic acid

Qassime Muhannad M, Goryacheva V. A., Al-Alwani A. J., Lugovitskaya T. N., Shipovskaya A. B., Glukhovskoy E. G.

[1]Saratov State University, Russia

Эл. почта: ammar.hamlet@mail.ru

Some of the prosperities of ascorbic acid (ASCA) form as a subphase, temperature in different concentration were investigated in the Langmuir technique. ASCA is a white crystalline solid soluble in water. When we talk about vitamin C, we refer to the group of ascorbic acid analogs that can be both synthetic and natural molecules [1]. It is primarily comes in two forms: **L**- ASCA and **D**- ASCA. Vitamin C has important roles lies in its biochemical function required for the biosynthesis of collagen, L-carnitine, and certain neurotransmitters.

Vitamin C is also involved in protein metabolism and also an important physiological antioxidant. Biological membranes contain lipid bilayers as their basic structural unit. Lipid bilayers are sheet-like assemblies of thousands of amphiphilic lipid molecules held together by hydrophobic interactions between their acyl chains. Lipid monolayers can be formed on the surface of water/buffer using a Langmuir film balance. In the *Langmuir model system*, various parameters such as *lipid composition*, *subphase*, and *temperature* can be chosen to imitate biological conditions. In addition, lipid monolayers are very well-defined, stable, homogeneous bi-dimensional system with planar geometry [2].

Membrane fluidity can be affected by a number of factors. One way to increase membrane fluidity is to heat up the membrane. Lipids acquire thermal energy when they are heated up; energetic lipids move around more, arranging and rearranging randomly, making the membrane more fluid [3]. An arachidic acid (ArA) 99 % and chloroform 99.5 % were received from Sigma Aldrich. The ArA was dissolved in chloroform to concentration of 0.1 M is used as a work solution. The 70 µl of work solution was sprayed first on the water subphase with resistivity 18,2 MOm×cm. second on *L*- and *D*-AscA (Meligen corp., RF and Khimreaktiv corp., RF, respectively) as subphase in concentration 10^{-1} and 10^{-3} M. After 5 minutes the monolayer was compressed by moveable barriers at the constant rate of area decreasing of 5 cm^2/min and this done in different temperatures 25, 37 and 41 °C.

The compression isotherms of Langmuir monolayers (*L*- & *D*-AscA) formation in concentration 10^{-3} and 10^{-1} M and temperatures were 25, 37 and 41 °C. The results show us a little different in the gas phase monolayer, liquid phase and collapses formation with different concentration of *L*- and *D*-AscA in temperature 25 °C. But, in the temperatures 37 and 41 °C we have different in the *L*- and *D*-AscA form, collapses, liquid and gas phase monolayer formation in different concentrations, this significant differences due to the effect of temperature on the surface tension of subphase will be decreased and this we can see clear in high concentration.

Список литературы

1. Li Y, Schellhorn H E. 2007 J Nutr 137 2171;
2. Jacob RA, Sotoudeh G 2002 Nutr Clin Care 5 66;
3. Gennis, R. B. (1989) Biomembranes: Springer, S. 419.

Разработка методов повышения достоверности результатов диагностики состояния человека пульсоксиметром

Гревцева А. С.[1], Давыдов В. В.[1], Грешневиков К. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: annagrevtseva@mail.ru

В настоящее время пульсоксиметрия является наиболее доступным методом мониторинга состояния человека во многих условиях. Простота и безболезненность процедуры измерения частоты сердечных сокращений, насыщение гемоглобина артериальной крови кислородом доказали обоснованность применения пульсоксиметра в различных областях медицины, спорте и индивидуальном пользовании. Сейчас в непосредственном применении остались два способа диагностики: трансмиссионная и отраженная пульсоксиметрия. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки, которые определили области их наиболее рационального применения. Например, контроль состояния пациента после операции (отраженная – датчики размещаются по всему телу), определение реакции организма на предельные нагрузки в спорте (отраженная), контроль человеком своего самочувствия в процессе дня в различных условиях (трансмиссионная) [1, 2]. Необходимо отметить, что именно личное использование трансмиссионной пульсоксиметрии делает исследования в этом направлении по-прежнему актуальными. Одним из которых является разработка новых методик оценки достоверности погрешностей измерений содержания кислорода в крови и частоты пульсовой волны, а также её формы. Последнее дает возможность осуществлять контроль состояния своего организма по работе сердца, как оно наполняет сосуды кровью.

Для минимизации влияния внешних факторов (яркий свет, стабильность работы лазера и фотоприемника, «чистота» и защищенность от механических повреждений оптических элементов) на погрешность измерения разработано и успешно используется большое число различных способов [3]. Наиболее сложной является зависимость погрешности измерения от человеческого фактора. В этом направлении проводится много исследований, на основании которых предлагаются различные решения. Одно из таких решений представляется в данной работе.

В результате проведенных нами экспериментов с использованием двух моделей пульсоксиметров (стационарного и автономного), в которых оптические датчики располагались на двух пальцах одной руки было установлено, что максимальное значение отношение сигнал/шум, регистрируемой фотоприемником датчика пульсоксиметра, прошедшего через сосуд с кровью лазерного излучения будет максимально, если поток крови в сосуде будет перпендикулярен направлению распространения лазерного излучения. Полученные результаты показали, что данное размещение можно достичь, используя минимум два датчика. При реализации данного положения направления лазерного излучения и потока крови, измеренные значения пульса и содержание кислорода в крови на двух датчиках совпадают в пределах погрешности измерения. Кроме того, существенно изменяется форма пульсовой волны, которая отображается на экране монитора

стационарного пульсоксиметра. На фронтах нарастания и спада пульсовой волны отсутствуют паразитные всплески и выбросы в виде острых пиков, по сравнению со случаем, когда настройка прибора осуществляется только в автоматическом режиме (без определения оптимального расположения датчика на пальце).

Полученный нами результат, в отличие от ранее применяемых методик, позволяет по регистрируемым искажению фронтов нарастания и спада в структуре пульсовой волны определять различные отклонения в работе сердца человека с высокой степенью достоверности. Так как появление дополнительных пиков на фронтах пульсовой волны будет в данном случае уже связано только с какими-то изменениями в организме, которые необходимо диагностировать с использованием дополнительной аппаратуры. Это будет являться одной из задач наших следующих исследований.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что в случае болезни крови, легких, употребления различных веществ, которые в своем составе содержат кислород, даже для относительно здорового человека оказывают существенное влияние на диагностику его состояния. Полученные результаты показали, что само влияние и, возможно, связанные с ним искажения в форме пульсовой волны настолько разнообразны, что идентификацию причин, вызвавших данные искажения, по результатам измеренных параметров делать не рекомендуется, так как вероятность ошибки очень высокая. Кроме того, увиденные пациентом результаты (большой пульс, например, выше 100, низкий кислород, например, меньше 90 %), которые по сути могут и не отражать реальность, вызовут у него нервное потрясение, которое начнет еще больше ухудшать результат измерения, наблюдаемый в реальном времени. При личной диагностике пульсоксиметр следует применять только в том случае, если человек ранее сам установил, какие значения, измеренных данным прибором показаний, соответствуют его комфортному состоянию.

Список литературы

1. Хизбуллин Р.Н. Оптический пульсоксиметр на основе лазерных датчиков для решения актуальных задач в медицинской практике. //Фотоника №1. С.144-157, 2017;
2. Федотов А.А., Акулов С.А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. //М.: Радио и связь № 6. С.209-225, 2013;
3. Шурыгин И.А., Мониторинг дыхания. Пульсоксиметрия, капнография,оксиметрия.//М.: "Издательство БИНОМ", С.11-50, 2000;
4. Федорова Т.Н., Чумак Е.Г.,Компьютерная пульсоксиметрия как метод оценки адекватности физических нагрузок//Актуальные проблемы адаптивной физической культуры и спорта,материалы всероссийской научно-практической конференции, С.155-162, 2016.

Сравнительный анализ изменений морфологических параметров клеток рака яичника при химиотерапии диоксадэтом и цисплатином

Жихорева А. А.[1,2], Белашов А. В. [1,2], Беспалов В. Г.[2,3], Васютинский О. С.[1], Жилинская Н. Т.[3], Романов В. А.[2,3], Семенов А. Л.[3], Семенова И. В.[1]

[1]ФТИ
[2]ИТМО
[3]НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова

Эл. почта: anna_zhikhoreva@mail.ru

Лечение онкологических заболеваний является одним из приоритетных направлений развития медицины. Для апробации различных методов терапии часто используют модели перевиваемых штаммов у лабораторных животных. Анализ эффективности применяемых методов лечения проводится на цитологических образцах, взятых у животных, прошедших курс лечения исследуемыми препаратами. Исследование фиксированных цитологических образцов проводится, как правило, только с помощью оптической микроскопии, а морфологические характеристики клеток определяются с применением стандартных тестов. Однако для более точного сравнительного анализа эффективности лекарственных препаратов необходимо проводить статистические оценки таких параметров клеток, как объем, сухая масса, показатель преломления, которые позволяют судить о физиологическом состоянии организма [1, 2]. Голографические методы исследования позволяют с высокой точностью определять эти параметры.

Численный анализ голограммы позволяет получить пространственное распределение фазового набега предметной волны, прошедшей через исследуемый объект. Фазовый сдвиг, полученный волновым фронтом при прохождении через клеточные структуры, позволяет вычислить такие параметры, как средний фазовый набег, сухая масса, толщина и интегральный показатель преломления клеток [3]. Методы голографической томографии позволяют восстановить трехмерные распределения показателя преломления в клеточных структурах. Для получения трехмерных распределений показателя преломления регистрируется серия голограмм под разными углами прохождения предметного пучка через образец. Полученные данные позволяют вычислить такие параметры, как объем клетки, площадь мембраны и показатель преломления в конкретной структуре клетки. Таким образом, голографические методы позволяют проводить численное сравнение морфологических и оптических параметров клеток при лечении различными препаратами и, как следствие, дать всестороннюю оценку эффективности исследуемых препаратов.

Эксперименты проводились на модели перевиваемого штамма рака яичников у половозрелых самок лабораторных крыс линии Wistar [4]. Прививаемость рака яичника составила 100 %. Рак яичников быстро прогрессировал, приводя к развитию перитонеального канцероматоза, вызывая асцит (у 90 % крыс геморрагический асцит) и гибель животного на 7–14 сутки. Моделировалась IV стадия рака яичника, так как опухоль перевивалась внутрибрюшинно, распространялась преимущественно по брюшной полости, что характерно для различных типов эпителиального рака яичника. Материалом для ци-

тологического исследования служили мазки асцитической жидкости лабораторных крыс, подвергшихся лечению двумя препаратами: диоксадэт и цисплатин. В качестве контрольного образца был проведен забор асцитической жидкости у крысы, не подвергавшейся лечению и находившейся в тех же условиях жизнеобеспечения.

В ходе работы были получены статистические распределения среднего фазового набега и сухой массы 3 типов клеток каждого образца. Было обнаружено уменьшение фазового набега в клеточных структурах образцов, взятых у животных, получавших химиотерапию, по сравнению с контрольным образцом, а также показано существенное различие величин фазового набега в клетках образцов крыс, получавших лечение препаратами диоксадэт и цисплатин. Получены трехмерные распределения показателя преломления в клеточных структурах для каждого типа клеток всех образцов и продемонстрированы различия внутриклеточной морфологии при лечении разными препаратами.

Список литературы

1. Aknoun S. et al. Living cell dry mass measurement using quantitative phase imaging with quadriwave lateral shearing interferometry: an accuracy and sensitivity discussion, Journal of biomedical optics, Т. 20, №. 12, С. 126009, 2015;
2. Mazarevica G., Freivalds T., Jurka A. Properties of erythrocyte light refraction in diabetic patients, Journal of biomedical optics, Т. 7, №. 2, С. 244-248, 2002;
3. Belashov A. V. et al. Refractive index distributions in dehydrated cells of human oral cavity epithelium, JOSA B, Т. 34, №. 12., С. 2538-2543, 2017;
4. Bespalov V. G. et al. Experimental study of antitumour activity and effects on leukocyte count of intraperitoneal administration and hyperthermic intraperitoneal chemoperfusion (HIPEC) with dioxadet in a rat model of ovarian cancer, Journal of Chemotherapy, Т. 28, №. 3, С. 203-209, 2016.

Алгоритм контроля качества сигнала ЭКГ, полученного с использованием тканевых электродов

Некрасов И. А.[1], Ван Г. В[1].

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: ivan.and.nekrasov@gmail.com

По мере старения населения все более актуальным становится повышение качества медицинского обслуживания. Непрерывная запись биомедицинских сигналов с помощью интеллектуальных устройств имеет важное значение при постановке диагноза, мониторинге и при лечении сердечно-сосудистых заболеваний. Носимые устройства, такие как умная одежда, позволяют производить раннее выявление острых кардиологических событий и диагностику сердечно-сосудистых заболеваний.

Тем не менее, смарт-одежда по-прежнему имеет несколько узких мест, одним из которых является повсеместное использование тканевых электродов, сигнал с которых

вследствие непостоянного контакта обладает повышенным уровнем шума относительно стандартных клейких электродов. Из-за таких искажений нередко повышается количество ложных срабатываний автоматических анализаторов.

Для снижения количества подобных ошибок алгоритм, проводящий интерпретацию ЭКГ, должен принимать решение о целесообразности использования данного участка кардиосигнала на основе объективных количественных оценок его качества и информации о правильности расположения электродов на груди пациента. В связи с этим целью данной работы явилась разработка алгоритма контроля в реальном времени уровня шумов электрокардиосигнала, полученного с использованием тканевых электродов [1].

Разработка и тестирование алгоритма были осуществлены при помощи языка программирования Python. Процесс работы алгоритма условно делится на три части:

1. Работа с записью сигнала.

2. Работа с аннотацией к сигналу.

3. Формирование признака пригодности сигнала.

Под «записью» имеется в виду файл, содержащий ЭКГ сигнал в виде последовательности отсчетов длительностью около получаса. Под «аннотацией» – файл, содержащий набор временных меток, указывающих на положение R зубцов, а также их описание.

Для исследования применимости алгоритма были использованы записи из базы MIT-BIH Arrhythmia Database, которые считаются общепризнанными и повсеместно используются для проверки качества работы автоматических анализаторов [3].

При работе с записями осуществлялось их скачивание и конвертация в формат, удобный для обработки, после чего запись подавалась на вход автоматического анализатора сигнала ЭКГ. Далее проводилось зашумление сигнала при помощи предварительно созданной модели сигнала ЭКГ, полученного с использованием тканевых электродов, после чего осуществлялся анализ зашумленной записи. После этого осуществлялось сравнение временных меток двух полученных результатов, признаков класса и некоторых дополнительных характеристик QRS комплексов. По результатам этого сравнения были сформированы информативные признаки, использовавшиеся для классификации желудочковых комплексов, среди них: отношение сигнал-шум зашумленного сигнала и созданной модели, сравнение форм QRS-комплексов, скорость нарастания сигнала, мощность сигнала, его размах, а также длительность и площадь QRS-комплекса. Для обработки полученных данных использовалась сверточная нейронная сеть, результатом работы которой было формирование признака пригодности для участков сигнала [4].

После описанной выше обработки формировался признак пригодности для участков сигнала, который заключался в отнесении исследуемого участка ЭКГ к одной из групп:

I группа – анализ сигнала невозможен;

II группа – возможен поиск R зубцов и R-R интервалов;

III группа – возможно определение ширины комплексов и классификация желудочковых экстрасистол (ЖЭ) [2].

Для каждой из групп были рассчитаны чувствительность и положительная предсказательность по формулам (1) и (2) [5].

$$SE = \frac{TP}{TP + FN} * 100\%, \quad (1)$$

$$P+ = \frac{TP}{TP + TN} * 100\% \quad (2)$$

где SE – чувствительность, P+ – положительная предсказательность, TP – истинно положительный результат, TN – истинно отрицательный результат, FN – ложно отрицательный результат.

Для I группы уровни SE и PP составили 89.6 и 87.9% соответственно.

Для II группы – 93.5 и 95.8% соответственно.

Для III группы – SE и PP относительно поиска R зубцов – 89.5 и 91.3%, а относительно классификации ЖЭ – 88.9 и 87% соответственно.

Список литературы

1. Козюра А. В. Разработка метода оценки качества электрокардиографического сигнала, Биотехносфера. — 2012. — 3-4 (21- 22). — С. 98-102;
2. Калиниченко А.Н. Методы цифровой фильтрации электрокардиосигнала в кардиомониторных системах: Дисс. канд. техн. наук. – Л.: ЛЭТИ 1988. – 206 с.;
3. Moody G. B., Mark R. G. The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database // IEEE Eng. in Med. and Biol. 2001. Vol. 20, № 3. P. 45–50.;
4. Deep learning, Ian Goodfellow, The MIT Press, 2016;
5. ГОСТ IEC 60601-2-51–2011. Изделия медицинские электрические. Ч. 2-51. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к регистрирующим и анализирующим одноканальным и многоканальным электрокардиографам. М.: Изд-во стандартов, 2013. 104 с.

Алгоритм кластеризации QRS-комплексов электрокардиосигнала

Ван Г. В.[1], Некрасов И. А.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: gennady.van@mail.ru

Количественный и качественный анализ характеристик QRS-комплексов электрокардиосигнала (ЭКС), а также временной последовательности их появления являются одними из основных инструментов в диагностике заболеваний сердца. Отклонения формы QRS-комплекса от нормы, изменения его амплитудно-временных характеристик и нарушение физиологических ритмов являются следствием различных патологий сердца. Актуальной является проблема точной кластеризации QRS-комплексов на записи. Однако решение данной задачи осложняется индивидуальной вариабельностью, а также присутствием в ЭКС шумов и артефактов различной природы.

Для решения данной задачи был предложен алгоритм кластеризации, состоящий из шести этапов, описанных ниже. Данный алгоритм основан на методе k-means, поскольку

данный метод обладает высокой точностью. Реализация алгоритма, а также результаты исследования были получены в среде разработки Jupiter Notebook для языка программирования Python 3 с использованием библиотеки машинного обучения scikit-learn [1].

На первом этапе производится съем зашумленного сигнала с пациента.

На втором этапе сигнал преобразовывается для повышения точности алгоритма. Для преобразования используется полосовой фильтр с полосой пропускания от 1 до 70 Гц.

На третьем этапе производится расчет адаптивных пороговых коэффициентов для каждого из информативных признаков. Для данного алгоритма была выбрана комбинация таких информативных признаков, как скорость нарастания сигнала, размах QRS-комплекса; частота, на которой находится максимальная амплитуда QRS-комплекса, а также площадь QRS-комплекса [2, 3].

На четвертом этапе проводится вычисление оптимального количество кластеров QRS-комплексов в ЭКС. В данной работе используется Elbow-метод.

На пятом этапе с помощью метода k-means формируется функция классификации, на основании которой проводится кластеризация QRS-комплексов.

На шестом этапе непосредственно проводится кластеризация QRS-комплексов в ЭКС на основании функции кластеризации метода k-means, сформированной ранее.

В качестве тестовых сигналов используются база данных аннотированных сигналов, содержащая 48 записей по трем стандартным отведениям, длительностью в 60 секунд с частотой дискретизации 250 Гц.

Точность алгоритма, Acc, определенная по формуле (1) составила 98,01% [4, 5].

$$Acc = \frac{P}{N} * 100\% ,$$

где P – количество правильно классифицированных QRS-комплексов; N – размер выборки.

Дальнейшее повышение точности данного алгоритма возможно за счет увеличения количества информативных признаков; корректировки процедуры предварительной обработки сигнала; изменение метода кластеризации, положенного в основу алгоритма.

Список литературы

1. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. — Springer-Verlag, 2009;
2. Van G.V., Podmasteryev K.V. The analysis of informative features for R-peak detection // XII Internantional Scientific Conferense «Physics and Radioelectronics in Medicine and Ecology» with Scientific Youth session PhREME’2016 (Vladimir — Suzdal, Russia, 5-7 July, 2016), Proceedings, Book II. — P. 126-129;
3. Hampton J.R. The ECG made easy. London: Churchill Livingstone, 2003;
4. ГОСТ IEC 60601-2-51–2011. Изделия медицинские электрические. Ч. 2-51. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к регистрирующим и анализирующим одноканальным и многоканальным электрокардиографам. М.: Изд-во стандартов, 2013. 104 с.;

5. Balouchestani, M. and Krishnan, S. (2016) Advanced K-Means Clustering Algorithm for Large ECG Data Sets Based on a Collaboration of Compressed Sensing Theory and K-SVD Approach. Signal, Image and Video Processing, 10, 113-120.

Исследование одиночных клеток и клеточных популяций с помощью электрической импедансной спектроскопии во временном представлении

Ступин Д. Д.[1,2], Корнев А. А.[1]

[1]СПБАУ РАН
[2]ИТМО

Эл. почта: stu87@ya.ru

Исследование живой материи является одним из актуальнейших направлений в современной экспериментальной физике [1-3]. В последние годы в данной области возрос интерес к безмаркерных, неразрушающим и неоптических методам диагностики биологических объектов, в частности к электрической импедансной спектроскопии (ЭИС) [4]. Например, Ivar Giaever предложил использовать ЭИС для изучения клеточных популяций [3], а Gregory Dittami и Fareid Asphahani применили ЭИС для изучения отдельных клеток [5, 6]. Очевидно, что для неразрушающего исследования биологических объектов с помощью ЭИС необходимо использовать низкое значение зондирующего напряжения (~10 мВ) и токового отклика (~100 нА) [6]. По этой причине в существующих на сегодняшний день методах ЭИС живой материи для измерения импеданса, как правило, используется помехоустойчивая техника синхронного усиления, которая, однако, не позволяет измерять импеданс с высокой скоростью и одновременно с высоким частотным разрешением. Таким образом, описанные в работах [3, 5, 6] подходы к изучению одиночных клеток и клеточных популяций могут быть значительно улучшены, если вместо синхронного усиления использовать современные высокоскоростные методы ЭИС во временном представлении: Фурье-ЭИС и ЭИС на основе адаптивной фильтрации (АФ-ЭИС) [7-9]. Данные методы ЭИС сканируют образец одновременно в целой полосе частот, за счет чего достигается высокое разрешение и высокая скорость измерений, что важно для исследования быстрых процессов, происходящих в клетках, например, в момент их гибели.

Таким образом, целью настоящей работы является апробация ЭИС во временном представлении для изучения клеточных популяций и одиночных клеток *in vitro*. В результате ее выполнения нами было установлено, что регистрация гибели под действием УФ излучения клеточной популяции, расположенной на электроде 50×250 мкм^2, возможна как с помощью Фурье-ЭИС, так и с помощью АФ-ЭИС, в то время как для регистрации гибели отдельных клеток, находящихся на электроде с диаметром 30 мкм, наиболее надежный результат дает АФ-ЭИС. Последнее является проявлением помехо-

устойчивости АФ-ЭИС, которая, являясь простейшим искусственным интеллектом, автоматически распознала в токовом отклике полезный сигнал и отделила его от шумов, возникших из-за уменьшения диаметра электрода до размеров одиночной клетки и, как следствие, уменьшения значения, протекающего через него тока с 1 мкА до 10-100 нА.

Мы надеемся, что разработанная нами АФ-ЭИС живой материи послужит фундаментом для создания прецизионных гибридных биоэлектронных сенсоров, которые позволят решить большинство актуальных проблем экологии и здравоохранения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00363\18.

Список литературы

1. Weinhausen B. et al. Scanning X-ray nanodiffraction on living eukaryotic cells in microfluidic environments //Physical review letters. – 2014. – Т. 112. – №. 8. – С. 088102;
2. Chernev A. L. et al. DNA detection by THz pumping //Semiconductors. – 2015. – Т. 49. – №. 7. – С. 944-948;
3. Wegener J., Keese C. R., Giaever I. Electric cell–substrate impedance sensing (ECIS) as a noninvasive means to monitor the kinetics of cell spreading to artificial surfaces //Experimental cell research. – 2000. – Т. 259. – №. 1. – С. 158-166;
4. Macdonald J. R., Barsoukov E. Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications //History. – 2005. – Т. 1. – №. 8;
5. Dittami G. M. et al. A multilayer MEMS platform for single-cell electric impedance spectroscopy and electrochemical analysis //Journal of Microelectromechanical Systems. – 2008. – Т. 17. – №. 4. – С. 850-862.Asphahani F. et al. Single-cell bioelectrical impedance platform for monitoring cellular response to drug treatment //Physical biology. – 2011. – Т. 8. – №. 1. – С. 015006;
6. Asphahani F. et al. Single-cell bioelectrical impedance platform for monitoring cellular response to drug treatment //Physical biology. – 2011. – Т. 8. – №. 1. – С. 015006.Popkirov G. S., Schindler R. N. A new impedance spectrometer for the investigation of electrochemical systems //Review of scientific instruments. – 1992. – Т. 63. – №. 11. – С. 5366-5372;
7. Popkirov G. S., Schindler R. N. A new impedance spectrometer for the investigation of electrochemical systems //Review of scientific instruments. – 1992. – Т. 63. – №. 11. – С. 5366-5372;
8. Chang B. Y., Park S. M. Electrochemical impedance spectroscopy //Annual Review of Analytical Chemistry. – 2010. – Т. 3. – С. 207-229;
9. Stupin D. D. et al. Adaptive Filtering to Enhance Noise Immunity of Impedance and Admittance Spectroscopy: Comparison with Fourier Transformation //Physical Review Applied. – 2017. – Т. 7. – №. 5. – С. 054024.

Биофизика

Локальные особенности фазовой синхронизации вызванных сигналов МЭГ человека

Панищева С. Н.[1], Панищев О. Ю.[1], Демин С. А.[1], Латыпов Р. Р.[1]

[1]КФУ

Эл. почта: opanischev@gmail.com

Исследование сложных систем живой природы неизбежно сталкивается с задачей количественной оценки возникающих коллективных эффектов и процессов синхронизации между отдельными частями изучаемого объекта. Синхронизация в общем смысле — это свойство систем различной природы вырабатывать единый ритм совместного действия. Выработка единого ритма заключается в том, что при синхронизации происходит захват собственных частот автоколебаний, когда система из N осцилляторов, каждый из которых имеет свою индивидуальную частоту, при наложении связей начинает колебаться с некоторой единой частотой, а также устанавливаются определенные стационарные значения разностей текущих фаз между колебаниями осцилляторов, не зависящие от начальных условий. В большинстве случаев фазу труднее измерить, чем частоту, а в случае негармонических колебаний, ее дополнительно непросто корректно определить. В то же время в последние годы широкое развитие получили нелинейные методы определения мгновенных фаз для негармонических сигналов [1].

В данной работе мы исследуем локальные особенности фазовой синхронизации индуцированных МЭГ сигналов здоровых людей и пациента с фоточувствительной эпилепсией (светочувствительной эпилепсией, ФЧЭ) [2] на основе поведения параметра «средняя фазовая когерентность» (mean phase coherence) [1]. Разработка процедуры вычисления параметра заключается в локализации методом пошагового сдвига вправо [3], которая используется для исследования эволюции данного параметра внутри изучаемых сигналов, и позволяет более детально рассматривать эффекты ослабления и усиления фазовой синхронизации. В частности, полученные результаты способствовали выявлению механизмов взаимодействия различных областей коры головного мозга человека при включении мерцающего стимула, а также установлению различий в реакциях на световой стимул у здоровых людей и пациента с ФЧЭ. Работа вызовет интерес у специалистов, ведущих свои исследования в области биофизики, нейрофизиологии, когнитивной психологии и других областях, связанных с изучением активности коры головного мозга человека при наличии и отсутствии патологий (в том числе при условии внешних воздействий).

Список литературы

1. Mormann F., Lehnertz K., David P., Elger C.E., Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients, Physica D, 144, 358-369, 2000;
2. Panischev O.Yu., Demin S.A., Bhattacharya J., Cross-correlation markers in stochastic dynamics of complex systems, Physica A, 389, 4958-4969, 2010;

3. Yulmetyev R.M., Demin S.A., Panischev O.Yu., Hanggi P., Age-related alterations of relaxation processes and non-Markov effects in stochastic dynamics of R–R intervals variability from human ECGs, Physica A, 353, 336-352, 2005.

Применение переменного магнитного поля для повышения эффективности выделения ДНК на магнитном сорбенте

Петров Д. Г., Антифеев И. Е.[1], Константинова Н.Н[1], Курочкин В. Е.[1], Дженлода Р. Х.[2], Шкинёв В. М.[2]

[1]ИАП РАН
[2]ГЕОХИ РАН

Эл. почта: dimoon88@mail.ru

Современные методы анализа генетического материала предъявляют высокие требования к качеству его пробоподготовки, включающющие очистку пробы от примесей и концентрирование целевого продукта. Наиболее доступным путём решения этой проблемы является использование высокоспецифических сорбционных методов, что позволяет многократно сконцентрировать целевой продукт.

В последнее время наибольшее распространение принял метод на основе магнитной сепарации. Таким способом можно отделять компоненты клеточного лизата, которые ингибируют дальнейший специфический анализ ДНК, например, полисахариды, фенольные компоненты, гумус. Однако, в случае работы с низкими, и предельно низкими концентрациями ДНК, требования к эффективности сорбционных методов существенно возрастают, и часто при использовании стандартных методик, не удаётся достичь необходимого уровня генетического материала, достаточного, для достоверного ПЦР анализа.

Решением проблем может являться применение микрофлюидных систем. Микрофлюидные системы с постоянным магнитным полем часто используются в настоящее время для выделения веществ (ДНК и РНК вирусных и бактериальных возбудителей заболеваний, а также выявления различных токсинов) с магнитными частицами перед их определением методом иммунноферментного анализа [1]. Преимуществом использования магнитных частиц является возможность удерживать частицы в потоке анализируемой пробы под воздействием магнитного поля. Недостатком такого подхода является агрегирование магнитных частиц, и образование застойных зон в рабочей камере.

В данной работе предложено использовать переменное магнитное поле для удержания и создания суспензии магнитных частиц размером 10-100 мкм. Переменное магнитное поле создается электромагнитом в зазоре между двумя П-образными магнитопроводниками, на которых расположена обмотка электромагнита. Для локализации и концентрирования магнитного поля, были использованы «направляющие», благодаря которым удалось создать магнитное поле силой 0,5 Т на 7,5 мм^2. Оценка эффективности данного способа была выполнена на примере выделения биологических веществ из модель-

ных растворов. В качестве рабочей емкости была использована стеклянная проточная ячейка. Использование проточной ячейки и электромагнита позволяет последовательно и непрерывно подавать реактивы, пропускать через камеру относительно большие объемы анализируемого образца, отмывать концентрат от примесей и проводить элюирование в автоматическом режиме. Детектирование выделенных веществ из модельных растворов возможно спектральными методами или ПЦР в реальном времени. Предложенный способ позволяет выделять и определять биологические вещества в проточном режиме методами флюориметрии, спектрофотометрии или ПЦР.

Авторы благодарят за финансовую поддержку программу Президиума РАН 36.

Список литературы

1. Qasem Ramadan, et al, Microfluid Nanofluid, (2012).

Моделирование процессов нуклеации и роста кристаллов белка в капиллярах

Соколовский А. С.[1], Беседина Н. А.[2], Дубровский В. Г.[1]

[1]ИТМО
[2]СПбАУ РАН

Эл. почта: sokolovskiy.a.s@niuitmo.ru

Кристаллизация биологических макромолекул — это чрезвычайно сложный процесс, именно поэтому основные методы кристаллизации основаны на высокопроизводительных технологиях скрининга [1]. В технологии скрининга перебираются от сотен до тысяч начальных условий кристаллизации в надежде на то, что будут определены оптимальные начальные условия, подходящие для выращивания больших кристаллов с минимальным возможным количеством дефектов. Высокое качество кристаллов биологических макромолекул необходимо для последующего их изучения отработанными твердотельными методами и установления трёхмерной структуры молекулы.

В данной работе предложена кинетическая модель и проведены компьютерные расчёты кристаллизации молекул белка. В качестве модельного объекта исследования был выбран белок лизоцим. Определены условия образования таких кристаллов. На основании полученных условий выращены отдельные кристаллы, пригодные для рентгенографического исследования.

Для описания процесса зародышеобразования белковых кристаллов использовалась классическая теория нуклеации [2]. Скорость роста кристаллов белка рассчитывалась согласно модели Колмогорова, Джонсона, Мела, Аврами [2]. В системе присутствует неоднородность концентрации молекул белка по объёму раствора. Для того, чтобы избавиться от данной неоднородности, капилляр разбивается на отдельные ячейки, при этом, предполагается, что в пределах одной ячейки концентрация зависит только от времени.

При моделировании вероятности появления кристаллов вдоль капилляра, предполагается, что вероятность зародышеобразования в любой ячейке случайна и зависит от формы критического зародыша, удельной поверхностной энергии и пересыщения раствора.

Кинетическая модель позволяет предсказывать оптимальные условия кристаллизации для получения больших кристаллов (~ 200 мкм). Были определены следующие начальные условия: длина капилляра 45 мм, внутренний диаметр капилляра 200 мкм, начальная концентрация белка 86 мг/мл. Разработанная кинетическая модель с высокой точностью описывает кинетику формирования кристаллов белка в капиллярах.

Список литературы

1. Sameer T., Paul J.A. Kenis and Charles F. Zukoski, A Kinetic Model To Simulate Protein Crystal Growth in an Evaporation-Based Crystallization Platform, Langmuir, 23, 4516-4522, 2007;
2. Dubrovskii V G Nucleation theory and growth of nanostructures (Heidelberg: Springer) 2014.

Исследование времен жизни и спектров люминесценции флуоресцеинов CF и MitoFluo в растворе в присутствии липосом

Бельтюкова Д. М.[1], Аббасов В. Р.[1,2], Антоненко Ю. Н.[3], Белик В. П.[1], Васютинский О. С.[1], Котова Е. А.[3], Семенова И. В.[1]

[1]ФТИ
[2]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
[3]НИИ ФХБ им. А.Н. Белозерского

Эл. почта: dina.beltukova@gmail.com

Для моделирования взаимодействия различных лекарственных препаратов с клеточной мембраной активно используют липосомы. Липосомы — это сферические везикулы, имеющие один или несколько билипидных слоев. Однако, контроль липосом не возможен прямыми методами. Для обнаружения липосом используют специальные красители – флуоресцеины. Как известно, при связывании флуоресцеинов с липосомами изменяются их фотофизические свойства, в частности время флуоресценции. Максимум полосы поглощения большинства флуоресцеинов приходится на 470-510 нм, а максимум полосы флуоресценции — на 510-550 нм [1].

В наших экспериментах возбуждение раствора флуоресцеина в буфере с нейтральным pH производилось импульсным лазером с длиной волны 490 нм и длительностью импульса 100 пс. Для регистрации фотофизических свойств растворов флуоресцеинов использовалась установка, построенная на базе монохроматора МДР-12, оснащенного дифракционной решеткой 1200 штр./мм с рабочей спектральной областью 280– 1000 нм [2]. Регистрация сигнала флуоресценции производилась ФЭУ Hamamatsu (H10682-01) с диапазоном чувствительности 250-800 нм. Исследование спектральных характеристик с

временным разрешением производилось методом время-корреляционной спектроскопии в режиме счета фотонов (TCSPC) с использованием измерительного модуля PicoHarp300 (PicoQuant).

В данной работе исследовались два вида флуоресцеинов: CF и MitoFluo и их смесь с двумя типами липосом: DOPC и A3+20% CL. Было показано, что при добавлении липосом вида DOPC происходит смещение максимума флуоресценции раствора с 520 нм до 530 нм, добавление липосом A3+20% CL не приводит к смещению пика флуоресценции. Также было установлено влияние липосом на время флуоресценции раствора: при добавлении липосом зависимость спада флуоресценции раствора становится двухэкспоненциальной.

Полученные результаты могут быть использованы для анализа взаимодействия различных флуоресцинов с клеточными и внутриклеточными мембранами.

Список литературы

1. Zhang X. F., Zhang J., Liu L. Fluorescence properties of twenty fluorescein derivatives: lifetime, quantum yield, absorption and emission spectra, Journal of fluorescence,v. 24. №. 3, p. 819-826, 2014;
2. Бельтюкова Д.М., Белик В.П., Васютинский О.С., Гаджиев И.М., Гончаров С.Е., Семенова И.В. Люминесценция водного раствора фотосенсибилизатора Р-дахлорин при возбуждении в полосах 405 и 605 nm, Оптика и спектроскопия, т. 124 №1, с 51-55, 2018.

Локализационная микроскопия структур, формируемых белком FtsZ в живых клетках Mycoplasma gallisepticum

Ведяйкин А.[1], Дробышева А. В.[1], Вишняков И. Е.[2], Ходорковский М. А.[1]

[1]СПбПУ
[2]ИНЦ РАН

Эл. почта: misterkotlin@gmail.com

Локализационная микроскопия (ЛМ) представляет собой разновидность флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения, которая позволяет преодолеть дифракционный предел путем временного разделения флуоресценции одиночных молекул и их последующей локализации. Этот метод позволяет получать разрешение порядка 10 нм в трех измерениях, даёт возможность визуализировать живые клетки в многоцветном режиме, поэтому он стал одним из самых востребованных методов визуализации в биологии.

В этом исследовании мы использовали метод ЛМ для изучения структур FtsZ в живых клетках бактерии *Mycoplasma gallisepticum*. Этот вид принадлежит к классу Микоплазм, которые считаются одними из наиболее редуцированных бактерий. Микоплазмы являются наименьшими свободно живыми организмами и считаются близкими к кон-

цепции минимальной клетки. В ходе эволюции бактерии вида *M. gallisepticum* сохранили ген белка FtsZ. Фактическая роль FtsZ в микоплазмах неизвестна, поскольку известная роль FtsZ у других видов связана с регуляцией синтеза клеточной стенки, которая отсутствует в микоплазмах.

Визуализация производилась с использованием установки на основе флуоресцентного неинвертированного микроскопа. Для реализации ЛМ установка предварительно была оснащена набором твердотельных и диодных лазеров, которые необходимы для возбуждения флуоресценции, высокочувствительной охлаждаемой ПЗС-камерой с электронным умножением, которая использовалась для регистрации флуоресценции одиночных молекул. Чтобы визуализировать белок FtsZ в живых клетках *M. gallisepticum*, мы использовали дополнительную копию гена *ftsZ*, слитого с геном фотопереключаемого флуоресцентного белка mMaple 2. Эта дополнительная копия была включена в хромосому *M. gallisepticum* посредством транспозонного мутагенеза.

Метод ЛМ в сочетании с эндогенным флуоресцентным мечением позволил нам впервые визуализировать структуры, образованные белком FtsZ, в живых клетках *M. gallisepticum*. Предварительные данные показывают, что белок слияния FtsZ с белком mMaple 2 образует плотные структуры внутри клетки. Эти структуры, по-видимому, свидетельствуют о возможной способности белка FtsZ полимеризоваться и тем самым подтверждают предположение, что FtsZ сохраняет свою принадлежность к цитоскелетным компонентам. Дальнейшее изучение должно уточнить фактическую роль FtsZ в микоплазмах.

Работа была поддержана Российским научным фондом, проект № 17-74-20065. Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Аналитический центр нано- и биотехнологий СПбПУ».

Использование флуоресцентной микроскопии в изучении влияния концентрации белков системы Esp1396I на степень защиты от бактериофага

Смирнов С. В.[1], Морозова Н. Е.[2], Ходорковский М. А.[2], Северинов К. В.[3]

[1]ИТМО
[2]СПбПУ
[3]Сколтех

Эл. почта: sergeiismirnoff@gmail.com

Системы рестрикции-модификации (Р-М) — это один из классов систем защиты бактерий от чужеродной ДНК. Действие систем Р-М II типа основано на работе двух ферментов: эндонуклеазы рестрикции, которая разрезает чужеродную ДНК по определенным сайтам узнавания, и метилтрансферазы, которая защищает эти же сайты путем метилирования. Если хотя бы одна из цепей ДНК метилирована в сайтах узнавания, то

рестриктаза не может осуществить расщепление. ДНК клетки с системой Р-М метилирована, а ДНК бактериофагов — нет и поэтому расщепляется рестриктазой. Однако если ДНК бактериофага подвергнется метилированию раньше, чем она будет расщеплена рестриктазой, то все потомство такого бактериофага будет иметь метилированную ДНК и будет устойчиво к действию данной системы Р-М. В статье М. Гельфанда биоинформатическими методами было показано, что пробои в защитной системе могут быть не только стохастическими, но и зависеть от соотношения концентраций метилазы и рестриктазы. В нашем исследовании мы хотим проверить это утверждение на практике. Ранее в нашей лаборатории была построена система Р-М с флуоресцентно меченной метилазой и рестриктазой.Однако из-за высокой степени защиты не удалось набрать достаточную статистику заражений. Поэтому было решено создать искусственную систему, позволяющую контролируемо изменять концентрации белков Esp1396I системы. На первом этапе работы мы создали плазмиду, которая позволяет экспрессировать дополнительную рестриктазу, а также регулировать уровень этой экспрессии. Для этого в плазмиду pACYC методом Gibson Assembly вставляли арабинозный промотор, далее флуоресцентно меченую рестриктазу помещали в полученную плазмиду под арабинозный промотор с помощью метододов рестрикции и лигирования. Компетентные клетки E.coli трансформировали полученной плазмидой. Выращенные клетки с плазмидой помещали под микроскоп на субстрат с добавлением арабинозы, тем самым индуцируя экспрессию рестриктазы. Изображения брали по двум каналам (в режиме проходящего света TL и в флуоресцентном канале mCherry) один раз каждые 10 минут. В ходе эксперимента, мы зафиксировли рост флуоресценции и соответственно экспресии исследуемого нами белка. Нами также был проведен эксперимент по увеличению экспрессии рестриктазы с использованием различных концентраций индуктора, когда в клетках уже имеется флуоресцентно меченная система Р-М, а также полученная нами плазмида синдуцируемой рестриктазой. Эксперимент показал увеличение защиты даже при самой низкой концентрации индуктора на 1,5 порядка. При дальнейшем увеличении концентрации индуктора дальнейшее улучшение защиты от бактериофага практически отсутствует, что может говорить о насыщении. В будущем планируется использовать флуоресцентно меченый бактериофаг для наблюдения за числом заражений клеток при различных концентрациях эндонуклеазы рестрикции.

Список литературы

1. Morozova N., Sabantsev A., Bogdanova E., Fedorova Y., Maikova A., Vedyaykin A., Rodic A., Djordjevic M., Khodorkovskii M. and Severinov K., Temporal dynamics of methyltransferase and restriction endonuclease accumulation in individual cells after introducing a restriction-modification system, Nucleic Acids Res, 44(2), 790–800, 2016;
2. Enikeeva N., Severinov K., Gelfand M., Restriction-modification systems and bacteriophage invasion: who wins?,J Theor Biol,266(4),550–559, 2010.

Локализация источников излучения от печатной платы в ближней зоне с применением вейвлет анализа

Скворцов И. В.[1], Бочкарев В. В.[1], Латыпов Р. Р.[1]

[1]КФУ

Эл. почта: skvorcov_ilya@mail.ru

На сегодняшний день задача определения наиболее активных областей излучения от печатной платы остается актуальной [1]. Наиболее популярным способом измерения излучения является сканирование значений напряженности электромагнитного поля от печатной платы в каждой точке наблюдения [1]. Печатную плату представляют в виде эквивалентной модели, которая представляет собой сетку, в узлах которой расположены диполи Герца. Такой подход является классическим, так как уравнения для диполей Герца хорошо известны [1, 2, 3]. Полученные при сканировании значения напряженности поля являются исходными данными для решения обратной задачи по нахождению локализации источников излучения. Искомым решением является распределение дипольных моментов на исследуемой плоскости. Решение обратной задачи в общем случае является некорректным. По этой причине используют процедуру регуляризации. Классическим подходом является использование процедуры регуляризации по Тихонову, которая решает некорректно поставленную задачу с помощью добавления некоторой дополнительной информации к условию, которой является параметр регуляризации с целью подбора наиболее точного решения задачи [1, 3]. Однако в реальных условиях на исследуемый объект оказывают влияние разного рода помехи. Помехи различаются по частоте и мощности излучения. Регуляризация по Тихонову с использованием параметра регуляризации способна распознавать источники излучения от печатной платы только для маломощных помех. В случаях, когда значение шума сопоставимо со значением полезного сигнала регуляризация оказывается малопригодной. В таких случаях весьма полезным способом выделение полезного сигнала является применение вейвлет анализа. Вейвлет разложение распределения дипольных моментов на печатной плате на соответствующие аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты помогает снизить уровень шумов путем подстройки коэффициентов. В данной работе предлагается использовать вейвлет анализ с целью локализации источников излучения от печатной платы в присутствие шумов высокой мощности. Приводится сравнение полученных результатов при регуляризации по Тихонову и с использованием вейвлет анализа в присутствие шумов высокой мощности. Вычислен предельный уровень шума, при котором распознава-

ние источников и их локализация с применением вейвлет анализа являются еще возможными.

Список литературы

1. Tong X., Thomas D. W. P., Biwojno K., Nothofer A., Sewell P., and Christoplous C.,“Modelling electromagnetic emissions from PCBs in free space using equivalent dipoles”, in Proc. 39th European Microwave Conference, pp. 280-283, Rome, Sep. 2009;
2. Obiekezie C., Thomas D. W., Nothofer A., Greedy S., Arnaut L. R., Sewell P., ‘‘Extended Scheme using Equivalent Dipoles for Characterizing Edge CurrentsAlong a Finite Ground Plane,’’ Applied Comp. Electromagn. Soc., vol. 28, nos. 11, pp. 1111-1121, Nov. 2013;
3. Glotov V., Romashchenko M., Methods of assessment of the near electromagnetic field by the method of equivalent models, Bulletin of Voronezh State Technical University, vol.12, №4,Voronezh, pp. 44-47, 2016.

Анализ устойчивости решений кинетических уравнений для моделирования течений газа при произвольном показателе адиабаты

Марнопольская Е. С.[1], Кривовичев Г. В.[1]

[1]СПбГУ

Эл. почта: marnlena@yandex.ru

В работе исследуются математические модели для описания течения газов в широком диапазоне числа Кнудсена на основе кинетических уравнений типа Бхатнагара — Гросса — Крука с одним временем релаксации, предложенные в работах других авторов. Уравнения получены посредством дискретизации кинетического уравнения Больцмана в пространстве скоростей. Рассматриваются модели, в которых используется уравнение состояния идеального газа в случае произвольного показателя адиабаты. Модели учитывают наличие вращательных и колебательных степеней свободы.

Невозмущенные решения системы уравнений соответствуют режимам течения в неограниченной области при постоянных значениях макроскопических характеристик. Производится линеаризация уравнений относительно невозмущенных решений и выводится система в отклонениях относительно возмущений. Посредством разделения переменных задача об анализе устойчивости по начальному условию сводится к задаче анализа устойчивости по Ляпунову нулевого решения системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с комплексными коэффициентами. Используется критерий устойчивости на основе знака вещественных частей собственных значений матрицы этой системы уравнений.

Анализ устойчивости реализуется с использованием численных методов решения задач на собственные значения. Программная реализация алгоритма осуществлена в па-

кете Matlab. В результате численных расчетов показано, при каком соотношении между макроскопической скоростью газа и характерной скоростью частиц решения представленных моделей являются устойчивыми и проведено сравнение моделей друг с другом.

Проведенное исследование относится к предрасчетному анализу задач газовой динамики и позволяет дать рекомендации по использовании той или иной модели в прикладных задачах.

О разностной схеме второго порядка для решения системы уравнений одномерной гемодинамики

Веригина М. А.[1], Кривовичев Г. В.[1]

[1]СПбГУ

Эл. почта: mari-veri701@yandex.ru

Рассматривается задача о численном решении системы уравнений, описывающей динамику крови на участке кровеносного сосуда в одномерном приближении. Модель состоит из нелинейных уравнений в частных производных первого порядка гиперболического типа, полученных посредством осреднения уравнений гидродинамики. В отличие от большинства аналогичных моделей, учет неньютоновости крови впервые осуществляется за счет аддитивного нелинейного члена, моделирующего нелинейную силу трения. Кровь рассматривается как степенная псевдопластическая неньютоновская жидкость. Обсуждаются особенности постановки начально-краевой задачи для представленной системы.

Для численного решения системы предлагается разностная схема второго порядка по времени и пространственной координате типа схемы Лакса — Вендроффа. Показано, что построенная схема обладает сильной численной дисперсией. Предлагается модифицировать схему посредством введения слагаемого с искусственной вязкостью. Ключевым является оригинальный подход к выбору значения коэффициента схемной вязкости посредством анализа диссипативной характеристики схемы, представляющей собой негладкую функцию от этого коэффициента.

При решении тестовых задач показано, что предлагаемый подход к выбору коэффициента схемной вязкости позволяет, с одной стороны, практически устранить наличие численной дисперсии, а с другой — производить расчеты задач с сильными изменениями функций, задающими начальные и граничные условия.

Applications of differential equations with logarithmic nonlinearity in physics

Zloshchastiev Konstantin[1]

[1]Durban University of Technology, RSA

Эл. почта: k.g.zloschastiev@gmail.com

Wave equation with logarithmic nonlinearity find fruitful applications in different branches of physics — from nuclear physics and condensed-matter theory to particle physics, theory of quantum gravity and models of physical vacuum. In order to derive this nonlinearity from basic principles, we apply statistical mechanics for an effective description of strongly-interacting many-body systems, such as Bose liquids or Korteweg-type materials. We show the relationship between the “logarithmic” fluids and those described by polynomially nonlinear wave equations, such as the Gross-Pitaevskii equation.

Список литературы

1. K. G. Zloshchastiev. Acta Phys. Polon. B 42 (2011) 261-292;
2. A. V. Avdeenkov and K. G. Zloshchastiev. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 44 (2011) 195303;
3. K. G. Zloshchastiev. Eur. Phys. J. B 85 (2012) 273;
4. V. Dzhunushaliev, A. Makhmudov, and K. G. Zloshchastiev. Phys. Rev. D 94 (2016) 096012;
5. K. G. Zloshchastiev. Z. Naturforsch. A 72 (2017) 677-687;
6. M. Znojil, F. Růžička, and K. G. Zloshchastiev. Symmetry 9 (2017) 165.

Численное моделирование динамики свободной границы фазового перехода «металл-гидрид»

Родченкова Н. И.[1], Заика Ю. В.[1], Грудова К. В.[1]

[1]ИПМИ КарНЦ РАН

Эл. почта: nirodchenkova@krc.karelia.ru

Одним из важных требований к изделиям из циркониевых сплавов активной зоны реакторов является низкое поглощение водорода, поскольку водородное охрупчивание может стать одной из причин разрушения циркониевой оболочки. В зависимости от уровня содержания водорода и температуры эксплуатации водород может находиться в циркониевых сплавах в виде твердого раствора или в виде гидридов. Наибольший охрупчивающий эффект оказывают гидриды, так как они могут служить участками образования и развития трещин.

Степень влияния гидридов на свойства циркониевых сплавов во многом определяется равномерностью распределения гидридных пластин. Экспериментально установлено,

что при эксплуатации в энергетических реакторах типа LWR (Light Water Reactor) при высоком выгорании и интенсивном наводороживании по толщине оболочки ТВЭЛа образуется градиент концентрации водорода и у наружной поверхности формируется плотный гидридный слой. Этот слой является потенциальным местом зарождения хрупкой гидридной фазы. В этой связи актуальными задачами являются: 1) разработка методики наводораживания образцов из сплавов циркония с обеспечением заданного градиента концентрации водорода и распределения гидридов по толщине; 2) численное моделирование движения свободной границы фазового перехода «металл-гидрид» для выделения лимитирующих процессов и прогнозирования ресурса безопасности.

Задача: оценить параметры модели движения фронта гидридообразования для циркониевого сплава Э110 (Zr–1Nb), определить закономерности динамики профилей концентрации водорода (в гидриде и растворе) и потоков, недоступных экспериментальному измерению. В докладе представлены результаты численного моделирования. На основе неявных разностных схем разработан итерационный вычислительный алгоритм решения нелинейной краевой задачи со свободной границей раздела фаз. В докладе представлены результаты численного моделирования.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН).

Учет взаимодействия с внешним электромагнитным полем при моделировании методом квантового Монте-Карло системы поляритонов в условиях оптической накачки

Карцев П. Ф.[1], Кузнецов И. О.[1]

[1]МИФИ

Эл. почта: PFKartsev@mephi.ru

Система экситонных поляритонов в резонаторе под действием оптической накачки представляет интерес в связи с возможностью получения состояния бозе-конденсата. В докладе показано моделирование системы при помощи диаграммного метода квантового Монте-Карло. Представлены результаты расчётов стационарного распределения частиц при различных вариантах оптической накачки.

Задача о состоянии бозе-газа поляритонов в условиях оптической накачки вызывает большой интерес. Прежде всего это связано с возможностью получения бозе-конденсата экситонных поляритонов в полупроводниковом образце в оптическом резонаторе [1, 2] при высоких температурах, близких к комнатной. Это открывает перспективы создания новых оптоэлектронных приборов и оптических преобразователей.

Для описания данной системы при высокой температуре в основном используются приближённые подходы, основанные на численном решении кинетических уравне-

ний [3] без учёта корреляций между числами заполнения. При низкой температуре система описывается волновой функцией конденсата и достаточно часто применяется численное решение соответствующего уравнения Гросса-Питаевского[4]. Для случая промежуточной температуры известен подход, учитывающий обе подсистемы [5]. Для учёта оптической накачки применяются различные модификации данных подходов [6].

В данной работе равновесное состояние системы поляритонов исследуется при помощи моделирования диаграммным методом квантового Монте-Карло.

В докладе представлены подробные аналитические выводы, даны результаты моделирования основного состояния бозе-газа поляритонов с учетом взаимодействия с внешним когерентным электромагнитным полем. Обсуждается определения оптимальных параметров для образования в системе бозе-конденсата, возможность моделирования его возникновения при помощи методов квантового Монте-Карло.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00278

Список литературы

1. Lambert K. van Vugt et al.,PNAS 108, No. 2, 10050-10055 (2011);
2. A. Rahimi-iman et al., Phys. Rev. B, 86, 153308 (2012);
3. P.F. Kartsev, I.O. Kuznetsov, J. Phys.: Conf. Ser. 737 012033 (2016);
4. I.V. Shunyaev, A.A. Elistratov, Yu.E. Lozovik, Phys. Rev. A 94,053625 (2016);
5. A. Griffin, T. Nikuni and E. Zaremba, Bose-condensed gases at finite temperatures (Cambridge: Cambridge University Press) (2009);
6. A. A. Elistratov, Yu. E. Lozovik, AIP Conference Proceedings 1874, 030009 (2017).

Процедура учета вихрей Абрикосова в рамках численного решения уравнений Гинзбурга-Ландау

Корчагин Д. С.[1], Карцев П. Ф.[1]

[1]МИФИ

Эл. почта: dmserkor@yandex.ru

Адекватное численное моделирование квантового состояния сверхпроводников второго рода, помещенных во внешнее магнитное поле, невозможно без учета физических эффектов, обусловленных наличием вихрей Абрикосова [1-4].

В настоящее время для решения данного класса задач в рамках теории Гинзбурга-Ландау преимущественно применяется подход, основанный на использовании различных численных методов решения систем нелинейных уравнений в частных производных. Так как указанный подход является крайне ресурсозатратным, то чаще всего получение практически значимых результатов невозможно без применения высокопроизводительных вычислительных комплексов (GPGPU, суперкомпьютеры) [5, 6]. При этом высокие требования к вычислительным ресурсам во многом обусловлены именно необ-

ходимостью корректного описания вихревых состояний при помощи расчетной сетки с малым шагом.

Несмотря на вышесказанное, представляется возможным использование альтернативного подхода, основанного на модификации математической постановки исходной задачи. В данной работе рассматривается процедура, основанная на выделении в общем решении системы уравнений Гинзбурга-Ландау быстро меняющейся компоненты (Ψ_2, $\mathbf{A}_2$), обусловленной наличием вихрей Абрикосова:

$$\Psi(\mathbf{r}) = \Psi_1(\mathbf{r}) + \Psi_2(\mathbf{r}),$$
$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mathbf{A}_1(\mathbf{r}) + \mathbf{A}_2(\mathbf{r}).$$

Так как структура уединенного вихря хорошо известна, то с вычислительной точки зрения указанная процедура может быть реализована путем представления быстро меняющейся части решения в виде функций:

$$\Psi_2(\mathbf{r}) = \prod_{i=1}^{N} \Psi_i^{(v)}(\mathbf{r}),$$
$$\mathbf{A}_2(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N} \mathbf{A}_i^{(v)}(\mathbf{r}),$$

где $\Psi_i^{(v)}(\mathbf{r})$ и $\mathbf{A}_i^{(v)}(\mathbf{r})$ – параметр порядка и векторный потенциал, соответствующие i-му уединенному вихрю, N – количество вихрей.

В результате подстановки указанного вида решения в исходную систему уравнений получается система уравнений для медленно меняющейся части решения исходной системы. Соответственно, становится возможным использовать расчётную сетку с более крупным шагом и, следовательно, существенно сократить вычислительные затраты.

В докладе приведены все необходимые аналитические соотношения, а также результаты моделирования тестовой физической системы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №18-02-00278.

Список литературы

1. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova and I.A. Rudnev, J. Phys. Conf. Ser. 507, 022017 (2014);
2. A. Snezhko, T. Prozorov and R. Prozorov, Phys. Rev. B 71, 024527 (2005);
3. M.P. Sørensen, N.F. Pedersen and M. Ogren, Physica C 533, 40 (2017);
4. I.G. de Oliveira, J. Supercond. Nov. Magn. 27, 1143 (2014);
5. A. Ardelea et al., Int. J. for Num. Met. Eng. 59(9), 1251 (2004);
6. I. Sadovskyy et al., J. Comput. Phys. 294, 639 (2015).

Скейлинг свободной энергии в модели димеров и шестивершинной модели

Nazarov Anton[1], Белов П. А.[1]

[1]СПбГУ

Эл. почта: antonnaz@gmail.com

Модель димеров и шестивершинная модель являются примерами интегрируемых решеточных моделей статистической физики, интерес к которым не пропадает уже несколько десятков лет [1]. В последние годы активно изучается явление предельной формы [2] и связь этих моделей с теорией случайных матриц [3].

Явление предельной формы состоит в том, что в скейлинговом пределе функция высоты оказывается фиксированной вне аналитической кривой, зависящей от формы области и граничных условий, а внутри сходится к определенной поверхности. Флуктуации вокруг этой поверхности описываются квантовой теорией поля во внешней метрике, задающейся предельной кривой. Предельную форму можно вычислить аналитически только в отдельных случаях.

Скейлинговое поведение удельной свободной энергии зависит от геометрии области. Мы приводим результаты Монте-Карло симуляций для шестивершинной модели и модели димеров, выполненных при помощи алгоритмов, основанных на марковских цепях и немарковского алгоритма Вонга-Ландау. В тех случаях, когда можно получить аналитический результат, мы сравниваем численные и аналитические значения.

Для прямоугольной области мы получили хорошее соответствие симуляции и теоретических предсказаний, как для симуляций при помощи алгоритма Метрополиса, так и алгоритмом Вонга-Ландау.

Список литературы

1. Baxter, Rodney J. Exactly solved models in statistical mechanics. Elsevier, 2016;
2. Kenyon, Richard, Andrei Okounkov, and Scott Sheffield. "Dimers and amoebae." Annals of mathematics (2006): 1019-1056;
3. Johansson, Kurt. "Non-intersecting paths, random tilings and random matrices." Probability theory and related fields 123.2 (2002): 225-280.

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ И ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Nanostructured Core-Shell Type Magnetic Particles for Biomedical Applications

Kamzin Aleksandr[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: kamzin@mail.ioffe.ru

The nanostructured Core-Shell Type Magnetic Particles has opened up new avenues in many different fields of applications along with other nanomaterials. The major advantages of nanoparticles over larger sized particles are its high surface-to-volume ratio and hence higher surface energy, unique optical, electronic, and excellent magnetic properties and so on. The high surface area also allows it to be modified. The magnetic nanoparticles (MNPs) are playing an important role in the wide range of various applications. At resent MNP with core-shell structures have attracted considerable attention because of their unique properties and various applications. Also, the synthesis of engineered core-shell structures MNP (CSMNP) has attracted practical interest because of potential applications in different areas such as ferrofluids, medical imaging, drug targeting and delivery, cancer therapy, separations, and catalysis.

CSMNP have a core made of a material coated with another material on top of it. CSMNP are a promising system for biomedical applications, because they combine a core (iron) with a high magnetic moment and a shell (iron oxide) with good biocompatibility. In biological applications CSMNP have major advantages over simple nanoparticles leading to the improvement of properties such as less cytotoxicity, increase in dispersibility, bio- and cyto-compatibility, better conjugation with other bioactive molecules, increased thermal and chemical stability and so on. It requires the development of multifunctional nanoparticles with biocompatibility, high relaxivity, high heat-generation power, controlled drug release, and tumor targeting.

Among various methods to the modification or functionalization of the surfaces of CSMNP with materials such as polymers, organic monolayers, oxides, and metals, one of the most important systems involves magnetic nanoparticles coated with gold shells.

This review focuses on the recent progress in synthesis and characterization of engineered magnetic core-shell structures in terms of their fundamentals of magnetism, hyperthermia applications, magnetic resonance imaging, and drug delivery, as well as the synthesis approaches and application examples. Because the quality and surface chemistry play important roles in biomedical applications, this review focuses on the surface modifications of CS nanoparticles.

In review are discussing some of the recent findings in the investigation of the synthesis, characterization and application of one intriguing class of CSMNP, i.e., magnetic nanoparticles coated with a gold shell.

Измерение магнитострикции насыщения аморфных сплавов $Fe_{80-x}Co_xP_{14}B_6$ методом малоуглового вращения намагниченности

Севериков Василий[1], Секирин И. В[2], Игнахин В. С[2], Гришин А. М[3]

[1]СПбПУ
[2]ПетрГУ
[3]KTH, Sweden

Эл. почта: severva3@gmail.com

Ключевые слова: металлические стекла, магнитострикция, магнитоупругий эффект Виллари, датчики механических напряжений и деформации, магнитомягкие сплавы.

В продолжение ранее докладывавшихся авторами работ по получению аморфных лент указанного состава и исследованию их войств проведено определение значений магнетострикции насыщения полученных материалов с использованием предложенного К. Нарита с сотр. [1] метода малоуглового вращения намагниченности (англ. SAMR – Small Angle Magnetization Rotation). Для проверки использовались полученные в тех же условиях ленты состава $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ (Metglas2826), свойства которых известны.

Во всех случаях необходимое для нахождения величины магнетострикции λ_S значение намагниченности насыщения M_s находилось в отдельном эксперименте, в котором снималась петля гистерезиса ленты [2].

Метод получения образцов описывался нами ранее и сводится к тому, что образцы получались методом быстрой закалки из перегретого индукционным способом расплава на массивном медном диске и получались в виде рентгеноаморфных быстрозакаленных лент номинального состава $Fe_{80-x}Co_xP_{14}B_6$ с x=25, 28, 32 и 40. Рентгеноструктурный анализ образцов подтвердил их аморфность.

Для лент образца сплава Metglas2826, выбранного в качестве эталонного, были получены значения M_s и λ_S равные 0,85 Тл и 17×10^{-6}. Значение M_s в пределах ожидаемой точности измерений совпадает с литературным значением, в то время как для λ_S наблюдается заметное расхождение (литературное значение составляет 126×10^{-6} [1, 3]), что может быть вызвано различиями в технологии приготовления образца (изменение состава, скорость охлаждения и т.п.).

Для образцов с x=25, 28, 32 и 40 были получены значения M_s и λ_S.

Величина предельной магнитострикции при изменении x изменяется немонотонным образом.

Список литературы

1. 1. Narita K., Yamasaki J., Fukunaga H. Measurement of saturation magnetostriction of a thin amorphous ribbon by means of small-angle magnetization rotation //IEEE Transactions on Magnetics. – 1980. – Т. 16. – №. 2. – С. 435-439;
2. 2. Severikov V.S., Grishin A.M., Ignahin V.S. Study of inverse magnetostrictive effect in metallic glasses Fe80-xCoxP14B6, Journal of Physics: Conference Series (In press);
3. 3. Hollmark M., Tkatch V.I., Grishin A., Khartsev S.I. Processing and properties of soft magnetic Fe40Co40P14B6, amorphous alloys. / IEEE transaction of magnetics., 2001, vol. 37, pp. 2278-2280.

Влияние эндоэдрального фуллерена на молекулярную подвижность полифениленоксида

Кононов А. А.[1], Кастро Р. А.[1]

[1]РГПУ

Эл. почта: rakot1991@mail.ru

Полимеры являются идеальными матрицами для создания новых материалов с заданными свойствами, в том числе для получения мембран широкого назначения. Одним из самых перспективных в качестве матриц для создания композиционных материалов полимеров является полифениленоксид (ПФО). Модификации полифениленоксида различными видами наполнителей приводят к существенным изменениям его диэлектрических, структурных и диффузионных свойств. В настоящее время наиболее интересными для модификации полимеров являются аллотропные формы углерода, одной из которых является фуллерен. Наряду с фуллеренами огромный интерес представляют эндоэдральные углеродные кластеры — фуллерены, содержащие во внутренней полости атомы металлов и неметаллов.

Объектом исследования в настоящей работе является полифениленоксид (ПФО), модифицированный путем введения фуллерена C_{60} и эндометаллофуллерена C_{60}-Fe в полимерную матрицу.

В данной работе представлены результаты исследований диэлектрических характеристик образцов композитов полифениленоксида (ПФО) с 1% содержанием фуллерена C_{60} и образцов композита ПФО с 1% ЭМФ Fe-C_{60}. Измерения диэлектрических спектров проводились на спектрометре «Concept 81» компании NOVOCONTROL Technologies GmbH&Co. Образцы представляли собой тонкие слои толщиной 60-125 мкм и диаметром 15 мм. Измерения параметров образцов ПКМ, были выполнены в интервале температур от 273 К до 573 К и частот $5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{6}$ Гц. Измерительное напряжение, подаваемое на образец, составляло 1.0 В.

Зависимости $\varepsilon'' = f(\nu))$ для исследованных систем описаны с помощью уравнения Гавриляка – Негами. В интервале температур 50 — 230°С диэлектрические спектры ап-

проксимируются одним релаксационным β — процессом. При более высоких температурах хорошая аппроксимация достигается, если зависимости $\varepsilon'' = f(\nu)$ представить суммой двух процессов (β и α) и вклада за счет проводимости. Температурные зависимости времени релаксации $-log\tau_{макс} = f(1/T)$, в области β процесса для образцов ПФО+C_{60} и ПФО+C_{60}-Fe линейны и описываются уравнением Аррениуса. Линейность зависимостей -$logt_{макс} = f(1/T)$ характерна для локальных форм молекулярной подвижности, описываемых моделью Дебая. Согласно этой модели, в отсутствие межмолекулярных взаимодействий, заряженная частица (диполь) может находиться в двух положениях равновесия, разделенных потенциальным барьером E_a = 8 — 12 ккал/моль. Для исследуемых образцов определена энергия активации релаксационного β – процесса, для чистого ПФО E_a=18.9 ккал/моль, для ПФО+1%C_{60} E_a=23.4 ккал/моль. Можно говорить о незначительном уменьшении молекулярной подвижности в фуллерен содержащих образцах по сравнению с чистым ПФО. Для образца ПФО+C_{60}-Fe так же рассчитана энергия активации релаксационного β – процесса: E_a=13.1 ккал/моль. Для образцов без Fe значения энергии активации β – процесса превышают таковые для локальной моды подвижности, что может быть вызвано вкладом межмолекулярных взаимодействий. Введение железа в фуллереновый каркас значительно уменьшает энергию активации локального релаксационного процесса полимерного композита. По-видимому, внедрение железа в фуллереновый каркас наделяет фуллерен, обладающий электроакцепторными свойствами, так же свойствами электродоноров, что может приводить к уменьшению межмолекулярного взаимодействия и увеличению подвижности молекул полимера.

The method of cathodic polarization and memory electrical switching in hydrated amorphous vanadium dioxide

Kuldin Nikolay[1], Cheremisin Alexander[1]

[1]Petrozavodsk State University, Russia

Эл. почта: kuldin@petrsu.ru

In this work we have studied the effect of hydrogen insertion on the properties of thin-film amorphous vanadium oxides obtained by anodic oxidation. Vanadium oxide films were prepared by means of anodic oxidation of vanadium metal layers deposited onto Si and glass-ceramic substrates by magnetron sputtering. X-ray diffraction studies showed that the films represented structurally disordered objects, and the phase compositions corresponded to either VO_2 or a mixture of VO_2 and V_2O_5, depending on the anodizing conditions; the film thickness was controlled by anodic potential. The process of oxidation was performed in the electrolyte containing 22 g of benzoic acid (C_6H_5COOH) and 40 ml of a saturated aqueous solution of sodium tetraborate ($Na_2B_4O_7{\times}10H_2O$) per 1 L of acetone. The hydrogen insertion into the prepared films was carried out in that same electrolyte, but under cathodic polarization.

The hydrogen concentration (i.e. x in the formula H_xVO_2) is straightforward to calculate from the above data on the basis of the Faraday law taking into account the 100% efficiency [1] of the reaction of H^+ insertion from the electrolyte into VO_2. Cathodic polarization at $j = 1$ mA·cm^{-2} for $t = 10$ s leads to a partial saturation of the film by hydrogen (average value of $x \sim 0.13$ in this case). Then, the top Au-electrode is deposited on to the H_xVO_2 surface and the Au/ $HxVO_2$/V structure is investigated.

Current instability and *I–V* curve nonlinearity is exhibited by the films subject to cathodic polarization. In *I–V* characteristics we can see that there are two steady branches in the curve demonstrating reversible switching with the memory effect. It should be noted that the current value is directly proportional to the top Au-electrode surface area.

Mechanism of nonlinear conductivity can be associated with a redistribution of H^+ ions inside the film; a similar process of hydrogen redistribution occurs in V_2O_5-gel based hydrated vanadium oxide at the internal electrochromic effect [2].

Список литературы

1. Ord J L, Bishop S D and De Smet D J 1991 *J. Electrochem. Soc.* **138** 208;
2. Pergament A L, Kazakova E L and Stefanovich G B 2002 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** 2187.

Получение наночастиц меди и оксида меди методом химического восстановления

Беглецова Н. Н.[1], Селифонова Е. И.[1], Чумаков А. С.[1], Аль-Алвани А. Ж. К.[1,2], Чернова Р. К.[1], Севостьянов В. П.[3], Глуховской Е. Г.[1]

[1]СГУ
[2]Вавилонский университет, Ирак
[3]НИИТОНХ и БТ

Эл. почта: nadya-beg98@yandex.ru

Одной из актуальных задач научных исследований является создание высокопроводящих пленок и гетероструктур для устройств микро- и наноэлектроники. В качестве основы для формирования функционального слоя можно использовать наночастицы (НЧ) различных металлов. Это связано с высокими каталитическими, оптическими, электрическими и др. свойствами, которыми характеризуются объекты при уменьшении из размеров в десятки раз.

Среди большого разнообразия металлов особый интерес изучения привлекают НЧ меди (Cu) благодаря высоким тепло- и электропроводности. Окисление поверхности НЧ Cu приводит к получению полупроводниковых частиц оксида меди (CuO) *p*-типа проводимости, с шириной запрещенной зоны $E_g = 1{,}2$ эВ. Чередование слоев на основе частиц с металлическими и полупроводниковыми свойствами будет способствовать развитию и усовершенствованию современных приборов и устройств электроники.

Существует много методов получения НЧ меди. Однако одним из широко распространенных является метод химического восстановления [1, 2]. При этом синтез частиц проводится в водных и неводных растворителях с использованием различных стабилизаторов (например, полимеров и поверхностно-активных веществ (ПАВ)) для предотвращения процесса окисления частиц. Проведенные ранее исследования показали, что использование ПАВ анионного типа способствует получению стабильных к окислению суспензий НЧ меди [3]. Поскольку требуется получить частицы двух типов, то необходимо подобрать оптимальные условия протекания химического восстановления и соответствующий тип ПАВ.

В рамках данной работы был проведен синтез НЧ меди в водном растворе ПАВ катионного типа — цетилпиридиния хлорида (ЦПХ) $C_{21}H_{40}ClNO$ при мольном соотношении прекурсора (хлорида меди) и восстановителя (гидразина) 1:12,5. Кислотность реакционной среды доводили до pH = 11,0 с помощью 25%-го раствора водного аммиака. Полученную суспензию с НЧ меди исследовали методами спектрофотометрического анализа и динамического рассеяния света. На спектрах поглощения данной суспензии были идентифицированы два пика поглощения при длинах волн λ_{max1} = 370 нм и λ_{max2} = 584 нм, характерные для НЧ CuO и Cu, соответственно. Полученные результаты с анализатора размеров частиц показали, что в растворе содержатся частицы меди с размерами в диапазоне от 3,6 до 4,8 нм.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-07-00407-а и № 17-32-50137-мол_нр.

Список литературы

1. Беглецова Н.Н., Селифонова Е.И., Захаревич А.М., Чернова Р.К., Глуховской Е.Г. Получение коллоидного раствора наночастиц меди с использованием катионного поверхностно-активного вещества // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия», 2017, Т. 9, № 4, с. 14–21;
2. Беглецова Н.Н., Шинкаренко О.А., Селифонова Е.И., Цветкова О.Ю., Захаревич А.М., Терин Д.В., Чернова Р.К., Глуховской Е.Г. Синтез наночастиц меди в мицеллах поверхностно-активного вещества // Практическая биомеханика: Материалы докладов Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием / Под ред. проф. Л.Ю. Коссовича. – Саратов: Буква, 2016. 136 с. – с. 70–71;
3. Беглецова Н.Н., Шинкаренко О.А., Переверзев Я.Е., Селифонова Е.И., Цветкова О.Ю., Захаревич А.М., Терин Д.В., Чернова Р.К., Глуховской Е.Г. Формирование монослоев додецилсульфата с наночастицами меди // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: сб. материалов VI Междунар. науч. конф. для молодых ученых. Саратов, 15-16 мая 2017 г. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 174 с. – с. 11–13.

Формирование металлического покрытия под ленгмюровским монослоем

Чумаков Алексей[1], Ермаков А. В.[1], Беглецова Н. Н.[1], Шинкаренко О. А.[1], Аммар Аль-Альвани Ж. К.[1], Глуховской Е. Г.[1]

[1]СГУ

Эл. почта: lehahares@rambler.ru

В работе описываются особенности формирования Ленгмюровских монослоев жирной кислоты на субфазе, содержащей ионы металла. Метод ленгмюра-блоджетт (ЛБ) при небольших экономических затратах позволяет получать тонкопленочные структуры с контролируемыми свойствами. Также стоит отметить возможность модификации метода и получения, таким образом, композитных органо-неорганических структур.

Одним из способов получения композитных пленок по методу ЛБ является добавление в субфазу ионов металла, которые могут связываться с молекулами монослоя, за счет их ионизации на поверхности воды [1]. Таким образом, возможно осуществить адсорбцию металла на нижнюю поверхность монослоя [2].

В экспериментах в качестве материала для формирования монослоя использовался раствор арахиновой кислоты в хлороформе, а в качестве источника металла – хлорид никеля, растворенный в субфазе (деионизованная вода). В экспериментах варьировалось время экспозиции монослоя (время от внесения материала монослоя на поверхность субфазы до начала сжатия) и составляло 5, 20 или 40 минут.

По результатам экспериментов было установлено, что при добавлении в субфазу соли изотермы сжатия монослоев смещаются в область больших площадей, приходящихся на молекулу. Так, площадь, приходящаяся на молекулу в твердоконденсированной фазе при добавлении ионов никеля в субфазу увеличивается на 5,8%, 15,2%, 24,4% в жидко-конденсированной фазе и на 0,6%, 12,7%, 17,7% в твердоконденсированной, для времен экспозиции 5, 20, 40 минут, соответственно. Также изменяются механические характеристики монослоя – давление коллапса и давление фазового перехода. Снижение значения давления фазового перехода монослоя говорит об изменении его структуры, так как выстраивание молекул в упорядоченную квазикристаллическую структуру происходит заметно раньше. Далее были изучены электрофизические свойства пленок с помощь зондовой станции и характериографа. Было показано, что пленки сформированные на субфазе с добавлением ионов никеля имеют гораздо большее значение проводимости (на три порядка).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 17-32-50137 мол_нр и DAAD 4.9977.2017/5.2

Список литературы

1. Kanicky, J. R., Shah D. O. Effect of Degree, Type, and Position of Unsaturation on the pKa of Long-Chain Fatty Acids, Journal of Colloid and Interface Science. 2002. Vol. 256. P.201-207;

2. Khomutov, G. Obydenov A., Yakovenko S., Soldatov E., Trifonov A., Khanin V., Gubin S. Synthesis of nanoparticles in Langmuir monolayer, Materials Science and Engineering C. 1999. Vol.8 (9). P.309-318.

Влияние температуры на самосборку квантовых точек в растворе жидких кристаллов

AL-Alwani Ammar[1], Chumakov A. S. [1], Shinkarenko O. A.[1], Begletsova N. N.[1], Qassime M. M.[1], Venig S. B.[1], Glukhovskoy E. G.[1]

[1]СГУ

Эл. почта: ammarjaberkadhim@gmail.com

В работе было изучено формирование монослоев квантовых точек CdSe с жидким кристаллом 4'-н-октил-4-цианобифенилацетат на границе раздела фаз «воздух-вода». Фазовый переход жидких кристаллов используется для создания организованной сборки квантовых точек. Контролирование условий, например, изменение температуры, приводит к перераспределению квантовых точек из упорядоченных доменов нематического жидкого кристалла в оставшиеся изотропные домены. Возможно, что в таком случае это повлияет на образование монослоя. Методом атомно-силовой микроскопии был исследован сформированный монослой квантовых точек. В зависимости от контролируемых параметров сборки квантовых точек, они могут отличаться электронными и фотонными свойствами [1] от отдельных частиц. Взаимодействия Ван-дер-Ваальса между квантовыми точками может затруднить процесс управления сборкой. Однако, используя мезогенные капиллярные лиганды, можно добиться увеличения дисперсии раствора квантовых точек. Это приведет к улучшению сборки за счет образования определенного расстояния между частицами. В зависимости от температуры жидкие кристаллы могут иметь разные термодинамические фазы между изотропной и твердой кристаллической фазой. При увеличении температуры раствора квантовых точек до 40 °C изотропная фаза жидких кристаллов будет увеличиваться, что приведет к увеличению дисперсии частиц. После этого сборка раствора квантовых точек будет контролироваться за счет системы охлаждения. При температуре ниже 34 °C увеличение скорости охлаждения сопровождается сборкой квантовых точек за счет изотропного перехода в нематический фазовый переход. Во время данного процесса квантовые точки имеют тенденцию оставаться в изотропной фазе при переходе к нематической фазе [2]. Переход жидкого кристалла приводит к «выталкиванию» квантовых точек, которые стабилизируют их за счет образования сферической оболочки. Увеличение концентрации квантовых точек при управлении системой охлаждения сопровождается образованием микромасштабной сборки частиц. Это исследование может быть полезно при формировании тонкой пленки квантовых точек с требуемыми свойствами для таких применений, как фотонные материалы и жидкокристаллический лазер.

Работа выполнена при поддержке грантом ДААД 4.9977.2017/5.2.

Список литературы

1. Cho, C. Y., Lee, S. J., Song, J.H., Hong, S. H., Lee, S. M., Cho, Y. H., Park, S. J., “Enhanced optical output power of green light-emitting diodes by surface plasmon of gold nanoparticles ”, Appl. Phys. Lett. 98, 051106 (2011);
2. Rodarte, A. L., Cisneros, F., Hein, J.E., Ghosh, S., Hirst, L.S., “Quantum Dot/Liquid Crystal Nanocomposites in Photonic Devices”, Photonics. 2, 855-864 (2015).

Самоорганизация кластеров в однородно неупорядоченных полимерных нанокомпозитных материалах

Спиров К.[1], Красовский А. Н.[1], Боридько Л. Ш.[2], Шмыков А. Ю.[2]

[1]СПбГТИ
[2]ИАП РАН

Эл. почта: constantin.spirov@yandex.ru

Представлены результаты изучения методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии в варианте декорирования наночастицами AgCl поверхности однородно неупорядоченных полимерных композитных пленок и покрытий, полученных из смесей ограниченно растворимых (взаимонерастворимых) компонентов.

Исследовали покрытия на стекле, полученные из мицеллярного раствора желатина (M_v=10.3×10^4 Да) вблизи пороговой концентрации c^*, соответствующей суперпозиции физической сетки зацеплений макромолекул (внутреннего перколяционного кластера) и наноглобул полимера, находящихся в ячейках сетки. Сетка макромолекул отображается мелкими частицами AgCl, а глобулам полимера отвечают крупные частицы AgCl.

Также изучали покрытие толщиной ~15 μm сшитого эпоксифенольного полимера (EP) на жести, полученное из раствора смеси эпоксидного (EO, M_n = 3400±200 Да) и фенол-формальдегидного (PO, M_n = 860 Да) олигомеров, отвержденной на воздухе при 483K в течение 15 мин. В этом случае в растворе имеет место микрофазовое разделение компонентов по механизму нуклеации и роста фрактальных кластеров EO, приводящее к образованию внутреннего перколяционного кластера или химической сетки сшитого EO.

Третий образец полимерного композита получен на основе цианэтилового эфира поливинилового спирта (CEPVA, M_n=5×10^4 Да) и микрочастиц титаната бария ($BaTiO_3$) диаметром ~0.6 μm, модифицированных кластерами шунгитового наноуглерода (Shu). Композитные пленки (40 об.% $BaTiO_3$) толщиной ~100 μm получены диспергированием микрочастиц в растворе CEPVA, нанесением композиции на стекло и вакуумной сушкой при 298K. Графеновые кластеры Shu являются структурным модификатором $BaTiO_3$.

Обсуждается самоорганизация кластеров частиц в композитах, в которых одна фаза образует структурный каркас внутреннего перколяционного кластера частиц. Полости

кластера заполнены дискретными агрегатами частиц второй фазы с относительно узким распределением агрегатов по размерам. Особая топологическая структура композитов возникает при пороговой концентрации модификатора, управляющего агрегацией частиц. Самоорганизация кластеров в такой фазе создает локальный порядок пространственного чередования агрегатов микрочастиц, минимизирует производство энтропии при формировании композитов и вызывает экстремальное изменение поверхностной энергии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-03-00625 и № 17-07-00945.

Список литературы

1. А.Н. Красовский, Д.В. Новиков, Е.С. Васина и др., Ближний порядок и фрактальная кластерная структура агрегатов микрочастиц титаната бария в композите на основе цианэтилового эфира поливинилового спирта, ФТТ, 57, 12, 2479-2484, 2015.

Исследование процессов формирования наноструктур In/AlGaAs методом капельной эпитаксии

Ерёменко М. М.[1], Михайлин И. А.[1], Балакирев С. В.[1], Солодовник М. С.[1], Агеев О. А.[1]

[1]ЮФУ

Эл. почта: mmeremenko@gmail.com

В последнее время полупроводниковые квантовые точки (КТ) все чаще рассматриваются как основа для создания новых устройств для нано- и оптоэлектроники из-за их исключительных оптических и электронных свойств [1]. Широко изученный метод Странски-Крастанова позволяет получать высококачественные КТ-массивы, однако обладает целым рядом фундаментальных ограничений, сужающих диапазон используемых материалов и, как следствие, функциональных характеристик формируемых структур. В то же время метод капельной эпитаксии лишен этих недостатков и позволяет создавать наноструктуры с независимым контролем их химического состава, поверхностной плотности и размера [2]. Несмотря на активное развитие данной технологии, целый ряд аспектов, связанных с пониманием лежащих в ее основе механизмов и процессов, остается мало изученным.

В данной работе изучено влияние состава эпитаксиального слоя и основных управляющих параметров процесса капельной эпитаксии на морфологические и структурные характеристики самоорганизующихся капельных массивов на поверхности GaAs(001). Исследования проводились при различных температурах, обеспечивающих As-стабилизированные условия на поверхности для всех образцов.

Результаты экспериментальных исследований системы In/AlGaAs показали существенное отличие от результатов, ранее полученных для Ga/AlGaAs в работе [3], что связано с гораздо большей подвижностью и химической активностью адатомов In на

поверхности. Так, при эффективной толщине осаждения 3 МС диаметр капли составлял 3,67 нм для Ga и 20,21 нм для In при T = 150°C. Размер капель увеличивался до 6,7 нм для Ga и до 98,41 нм для In с увеличением температуры подложки до T = 300°C. Следует особо отметить, что дисперсия размеров в случае In в среднем уменьшается от 30% при T = 150°C до 5% при T = 300°C, что также обусловлено более высокими значениями диффузии адатомов по поверхности.

Увеличение содержания Al в эпитаксиальном слое значительно изменяет кинетику процессов роста. При низких температурах роста (ниже 200°C) увеличение мольной доли Al приводит к увеличению плотности капель с $2{,}2\times10^{9}$ см$^{-2}$ до $2{,}1\times10^{10}$ см$^{-2}$ с незначительным изменением их размеров (около 20 нм). Увеличение температуры роста до 300°C приводит к увеличению размеров капель с увеличением содержания Al, сохраняя при этом разницу в плотности на порядок. Так, при 3 МС средний диаметр капель увеличивался от 98 нм до 177 нм, а плотность уменьшалась от $1{,}8\times10^{8}$ см$^{-2}$ до $3{,}7\times10^{7}$ см$^{-2}$ для при изменении доли Al с 0% до 100% соответственно. Анализируя совокупность полученных данных, можно сказать, что диапазон изменения плотности ансамблей наноструктур имеет тенденцию расширяться по мере увеличения содержания Al в поверхностном эпитаксиальном слое.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-10006) и Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект № МК-2629.2017.8). Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного использования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

1. Henini M., Quantum dot nanostructures, Materials today, 5, 48, 2002;
2. Koguchi N., Takahashi S., Chikyow T., New MBE growth method for InSb quantum well boxes, Journal of Crystal Growth, 111, 688, 1991;
3. Solodovnik M. S., Balakirev S. V., Eremenko M. M., Mikhaylin I. A., Avilov V. I., Lisitsyn S. A. and Ageev O. A., Droplet epitaxy of GaAs nanostructures on the As-stabilized GaAs(001) surface, Journal of Physics: Conference Series, 917, 032037, 2017.

Электрические свойства композитных плёнок GO:TiO_2 и PEDOT:TiO_2

Базанова А. А.[1,2], Алешин А. Н.[2]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
[2]ФТИ

Эл. почта: bazanova.anya2012@gmail.com

Недавние разработки и исследования полупроводниковых полимерно-неорганических гибридных нанокомпозитов вызвали огромный интерес у исследователей как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения, так как такие композиты находят применение в различных высокотехнологичных областях производства. Это связано с их свойствами, а именно гибкостью, технологичностью, возможностью печати на большой площади и легким весом наряду с заметной электропроводностью и низкой теплопроводностью, что может способствовать их применению в светоизлучающих устройствах.

Физические и химические свойства проводящих полимеров можно контролировать, путем варьирования их химического дизайна и методов синтеза. Проводящие полимеры, такие как полианилин, политиофен, PEDOT, полиацетилен, полипиррол и их производные, обладают большим потенциалом для использования в электронных и энергетических устройствах. Проводящий полимер PEDOT:PSS обладает такими преимуществами, как прозрачность, простота подготовки, термостабильность, а также настраиваемая электропроводность путем легирования. Иерархические наноструктурированные оксиды металлов привлекают большой интерес из-за их потенциальных применений в сверхэлектронных устройствах. Среди оксидов металлов TiO_2 имеет такие преимущества, как легкость получения, высокая концентрация носителей заряда и подвижность, а также контролируемая морфология. Известно, энергия запрещенной зоны около 3.2eV позволяет TiO_2 поглощать ультрафиолетовый (УФ) свет, на который приходится около 4% всего спектра солнечного света.

Уникальность электронных и оптических свойств графена обусловлена его зонной структурой. Графен является полупроводником с нулевой запрещенной зоной, в котором движение электронов описывается не уравнением Шредингера, а двумерным уравнением Дирака для безмассовых квазичастиц, что обусловлено наличием в первой зоне Бриллюэна точек, вблизи которых закон дисперсии энергии электронов имеет линейную зависимость от волнового вектора. Именно вследствие этого в графене и наблюдается сверхвысокая подвижность электронов. Известно, что подвижность в графене в несколько раз превышает подвижность в кремнии. Электроны в графене перемещаются лишь в двух измерениях и способны пролетать до 16 микрометров при этом не рассеиваться, т.е. они не сталкиваются с атомами углерода и другими электронами. Оксид графена является полупроводником с конечной величиной запрещенной зоны, в зависимости от условий синтеза. Высокая проводимость оксида графена и его способность менять свои свойства при отжиге делает его перспективным для приборных применений.

Исследованы электрические свойства пленок на основе композитов GO:TiO_2 и PEDOT:TiO_2. Получены образцы и проведено исследование рельефа поверхности композитных пленок GO:TiO_2 методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Показано, что пленки имею глобулярную структуру при среднем размере зерна ~ 200-300 нм. Измерены вольт-амперные характеристики для таких материалов, рассчитаны величины удельного сопротивления пленок GO:TiO_2 и PEDOT:TiO_2 при разных температурах, проведено их сравнение. В работе получены зависимости удельного сопротивления от температуры для двух композитов, было установлено, что в этих зависимостях с понижением температуры наблюдается переход в энергии активации – от больших к меньшим значениям, при этом величины их различны для двух видов композитов 202 и 301 мэВ. Представлены и проанализированы зонные диаграммы для двух материалов.

Список литературы

1. Agranovich, V. M.; Gartstein, Yu. N.; Litinskaya, M. HybridResonant Organic-Inorganic Nanostructures for OptoelectronicApplications. Chem. Rev. 2011,111, 5179−5214;
2. McGrail, B. T.; Sehirlioglu, A.; Pentzer, E. Polymer Compositesfor Thermoelectric Applications. Angew. Chem., Int. Ed. 2015,54,1710−1723;
3. Janáky, C.; Rajeshwar, K. The Role of (Photo) Electrochemistryin the Rational Design of Hybrid Conducting Polymer/SemiconductorAssemblies: From Fundamental Concepts to Practical Applications.Prog. Polym. Sci. 2015,43,96−135;
4. Du, Y.; Shen, S. Z.; Cai, K.; Casey, P. S. Research Progress onPolymer−Inorganic Thermoelectric Nanocompo-site Materials. Prog.Polym. Sci. 2012,37, 820−841.

Кельвин-зонд микроскопия монослоев $MoSe_2$ на графене

Бородин Б. Р.[1], Алексеев П. А.[1], Дунаевский М. С.[1,2], Бенимецкий Ф. А.[2], Лебедев С. П.[1], Лебедев А. А.[1]

[1]ФТИ
[2]ИТМО

Эл. почта: nadgob95@yandex.ru

В настоящее время свойства дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) представляют большой интерес для изучения. Это связано с их применением [1, 2] для создания устройств электроники, оптоэлектроники и валлитроники. Наиболее изученным ДПМ материалом, является MoS_2 [3]. Электронные свойства таких материалов сильно зависят от количества слоёв [4] и состояния поверхности. Так, например, адсорбированная вода на поверхности таких устройств, приводит изменению электронных свойств структуры [5]. Как правило, количество слоёв в ДПМ и влияние диэлектрического окружения на их электронные свойства может быть определено с помощью фотолюминесценции и Рамановской спектроскопии [6]. Однако электронные свойства Ван-дер-Вальсовых (вдВ) материалов также могут быть исследованы методом сканирующей

Кельвин-зонд микроскопии (КЗМ). Так например, методом КЗМ была показана возможность определения количества слоёв в графене и MoS_2 [4]. Также была изучено влияние адсорбированной воды на поверхностный потенциал в MoS_2. Стоит отметить, что ДПМ представляет довольно широкий класс материалов, свойства некоторых из которых всё ещё изучены слабо. Особый интерес представляют гетероструктуры сформированные из вдВ материалов. Целью данной работы было исследование электронных свойств слоёв $MoSe_2$, перенесённых на моно- и бислои графена на подложке SiC. Стоит отметить, что $MoSe_2$ представляет большой интерес для применения в приборах оптоэлектроники, так, например, для этого материала недавно была предсказана возможность создания экситон-поляритонного конденсата при комнатной температуре [7].

Эксперимент производился на приборе Ntegra Aura (NT-MDT) с использованием Si (NT-MDT) зондов с диаметром острия 30 нм в условиях контролируемой влажности воздуха. Тонкие слои $MoSe_2$, полученные микромеханическим расслоением, переносились на графен. При исследовании измерялась топография поверхности образца и распределение поверхностного потенциала. Из изображения топографии поверхности определялось количество монослоёв $MoSe_2$. Для определения работы выхода участков $MoSe_2$ с разным количеством слоёв, использовалось известное значение работы выхода моно- и бислоёв графена, 4.55 и 4.44 эВ соответственно. Увеличение влажности приводило к экранировке поверхностного потенциала слоя $MoSe_2$ слоем адсорбированной влаги, что согласуется с известными результатами для MoS_2 [4]. Увеличение количества слоёв $MoSe_2$ приводило к нелинейному увеличению их работы выхода, что можно объяснить особенностями межслоевого экранирования [4]. Так для монослоя работа выхода составила ~ 4,3 эВ, для бислоя ~ 4,34 эВ, для трёхслоя ~ 4,375 эВ. Стоит отметить, что участок монослойного $MoSe_2$ был перенесён на поверхность с монослоем и бислоем графена. Однако распределение поверхностного потенциала $MoSe_2$ было практически однородно, что указывает на полную экранировку потенциала подложки даже монослоем $MoSe_2$. Было исследовано несколько участков образца с различным количеством слоёв, измеренные значения работы выхода достаточно хорошо воспроизводились.

Таким образом, в работе были исследованы свойства тонких слоев $MoSe_2$ на графене. Были определены зависимости поверхностного потенциала и работы выхода от количества слоев и уровня влажности воздуха. Результаты работы позволяют говорить о КЗМ, как о эффективном методе для определения количества слоёв в $MoSe_2$.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-5852.2018.2

Список литературы

1. Fontana M. et al., Electron-hole transport and photovoltaic effect in gated MoS2 Schottky junctions, Scientific Reports, Vol. 3, P. 1634, 2013;
2. Zeng H. et al., Valley polarization in MoS2 monolayers by optical pumping, Nature Nanotechnology, Vol. 7, P. 490, 2012;
3. Duan X. et al., Two-dimensional transition metal dichalcogenides as atomically thin semiconductors: opportunities and challenges, Chem. Soc. Rev., Vol. 44, P. 8859, 2015;

4. Feng Y. et al., In situ visualization and detection of surface potential variation of mono and multilayer MoS2 under different humidities using Kelvin probe force microscopy, Nanotechnology, Vol. 28, P. 295705, 2017;
5. Schmidt H. et al., Electronic transport properties of transition metal dichalcogenide field-effect devices: surface and interface effects, Chem. Soc. Rev., Vol. 44, P. 7715–7736, 2015;
6. Tonndorf P. et al., Photoluminescence emission and Raman response of monolayer MoS2, MoSe2, and WSe2, Optics Express, Vol. 21, P. 4908–4916, 2013;
7. Lundt N. et al., Monolayered MoSe2: a candidate for room temperature polaritonics, 2D Materials, Vol. 4, 015006, 2017.

Исследование оптических свойств мембран поликристаллического анодного оксида алюминия в инфракрасной области спектра

Муратова Е. Н.[1], Матюшкин Л. Б.[1], Чернякова К. В.[2], Врублевский И. А.[2]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
[2]БГУИР, Белоруссия

Эл. почта: SokolovaEknik@yandex.ru

В настоящее время большое внимание уделяется изучению свойств оптических материалов, обладающих одновременно высокой прозрачностью в инфракрасной (ИК) области спектра и высокой механической прочностью. С этой точки зрения прозрачная керамика из оксида алюминия занимает важное место в ИК оптике. Исследования механических свойств поликристаллической керамики показали важность контролируемого формирования микроструктуры для обеспечения стабильности свойств при высоких температурах эксплуатации. Микроструктура поликристаллического материала, как было обнаружено, может определять не только механические, но и другие физические, в частности оптические свойства материала.

В наших предыдущих работах [1, 2] были изучены спектры пропускания тонких мембран оксида алюминия в широком диапазоне длин волн и проанализированы спектральные области, которые характеризовали определенные свойства мембран. Показано, что мембраны пористого оксида алюминия с аморфной структурой значительно блокируют инфракрасное излучение в диапазоне 8-14 мкм. В то же время оптические свойства поликристаллического анодного оксида алюминия, в отличие от аморфного анодного оксида алюминия, пока еще слабо изучены.

В данной работе представлены результаты исследований микроструктуры и оптических свойств поликристаллического анодного оксида алюминия, сформированного двусторонним анодированием образцов алюминия в 2,0 М водном растворе серной кислоты при постоянной плотности тока 320 А $м^{-2}$ до момента полного окисления алюминия [3]. Перевод аморфной структуры анодного оксида в кристаллическую структуру осуществляли за счет кристаллизации во время высокотемпературной обработки. Для этого ис-

пользовался следующий режим обработки: температура постепенно возрастала от комнатной температуры до 800 °С, а затем от 800 до 1200 °С со скоростью нагрева около 100 °С в час для предотвращения термического крекинга и скручивания образцов. Термообработка образцов анодного оксида при температуре 1200 °С позволила получить наноструктурированную алюмооксидную керамику с требуемыми оптическими характеристиками.

Беспористая прозрачная керамика из оксида алюминия (поликор) также имеет высокое значение коэффициента пропускания ИК излучения. В отличие от анодного оксида алюминия, который модифицируется в поликристаллический материал из однородной аморфной структуры путем высокотемпературного отжига, оптическая керамика поликор формируется спеканием глинозема.

Результаты исследований показывают, что поликристаллический анодный оксид алюминия благодаря своей оптически неоднородной структуре характеризуется более широкой полосой пропускания (3,9–8,0 мкм) и более высокой прозрачностью, чем оптическая керамика из оксида алюминия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-80152 мол_а_дк.

Список литературы

1. Muratova E.N., Matyushkin L.B., Moshnikov V.A., Chernyakova K.V., Vrublevsky I.A. Thermal radiation shielding by nanoporous membranes based on anodic alumina / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 872 (2017) 012020. DOI:10.1088/1742-6596/872/1/012020;
2. Matyushkin L B, Muratova E N, Panov M F 2016 Micro & Nano Letters 12 100, doi: 10.1049/mnl.2016.0353;
3. Vrublevsky I., Chernyakova K., Ispas A., Bund A., Gaponik N., 2011 J. Lumin 131 938.

Магнитоплазмонная гетероструктура на основе наночастиц золота и пленок феррита-граната

Комаров Р. С.[1], Белотелов В. И.[1,2], Калиш А. Н.[1,2], Кожаев М. А.[2,3], Бержанский В. Н.[4], Шапошников А. Н.[4], Каравайников А. В.[4], Прокопов А. Р. [4], Томилин С. В.[4]

[1]МГУ им. М. В. Ломоносова
[2]РКЦ
[3]ИОФ РАН
[4]КФУ им. В. И. Вернадского

Эл. почта: romakom95@mail.ru

Одной из самых молодых и наиболее актуальных наук в настоящее время является плазмоника — область фотоники, которая изучает плазмоны — гибридные колебания

электромагнитного поля и электронной плазмы. Важным приложением плазмоники является возможность усиления магнитооптических эффектов, позволяющих контролировать свет за счёт магнитного поля. Примером магнитооптического эффекта является эффект Фарадея, который вызывает вращение плоскости поляризации света, проходящего через образец. Было продемонстрировано усиление эффекта Фарадея при возбуждении поверхностного плазмона-поляритона [1, 2]. Это было показано в плазмонных кристаллах — структурах, состоящих из однородного магнитного диэлектрика, покрытого золотом.

Настоящая работа посвящена изучению усиления эффекта Фарадея за счет замедления света в магнитных средах. Для этого были разработаны и созданы магнитные композиты с металлическими частицами, случайно расположенными в магнитном диэлектрике. Свет возбуждает локализованный поверхностный плазмон в металлических частицах во время распространения через среду, что приводит к увеличению оптического пути и угла Фарадея. Состав образцов выглядит следующим образом: поверх подложки $Gd_3Ga_5O_{12}$ имеется слой наночастиц золота, полученный путем отжига твердого слоя золота. Золотые наночастицы покрыты висмутом-замещенным ферритом-гранатом $Bi_{2.5}Gd_{0.5}Fe_{3.8}Al_{1.2}O_{12}$. Размер наночастиц, полученных при отжиге, варьируется в диапазоне от 50 до 400 нм. Толщина слоев граната составляет 100 нм. Рассмотрено два образца: один с одной парой слоев золота / диэлектрика и один с тремя парами слоев золота / диэлектрика друг над другом. Образцы были созданы в лаборатории проф. В.Н. Бержанского (Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь).

Выполнены измерения оптического и магнитооптического спектров нанокомпозитных материалов. Эффект Фарадея и соответствующие спектры пропускания измерялись при нормальном падении светового пучка на образец. В этом случае локализованный поверхностный плазмонный резонанс четко проявляется в спектре пропускания. Этот резонанс смещается и расширяется с увеличением эффективной толщины слоя золота.

Было продемонстрировано усиление магнитооптического эффекта в магнитном нанокомпозите. Например, в эксперименте с образцом, содержащим один магнитный диэлектрический слой с золотыми наночастицами, мы показали возбуждение локализованного поверхностного плазмона в диапазоне длин волн от 680 до 800 нм. При наличии золотых наночастиц в гранатовой матрице эффект Фарадея увеличивается от 0,2 до 0,5 градусов при длине волны света в 680 нм, т.е наблюдается более чем двойное усиление магнитооптического эффекта.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-02-01065.

Список литературы

1. Belotelov, V. I., et al. "Plasmon-mediated magneto-optical transparency."Nature communications 4 (2013): 2128;
2. Belotelov, V. I., A. N. Kalish, and A. K. Zvezdin. "Magneto-Optics of Plasmonic Crystals."Magnetophotonics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. 51-106.

Термодинамический анализ образования соединений в системах кремний-углерод-металл

Григорьев М. Н.[1], Мясоедова Т. Н.[1], Плуготаренко Н. К.[1]

[1]ЮФУ

Эл. почта: gregoryevmikhail@mail.ru

Кремний-углеродные пленочные материалы, получаемые из кремнийорганического вещества, обладают высокой адгезией к различным подложкам (кремний, ситалл, стекло, корунд и т.д.) и термостабильностью (не менее 300 °С) и могут быть получены с толщиной до 100 мкм [1-3]. Серьезным отличием нанокомпозитов на основе кремний-углеродных пленок от других углеродных покрытий является то, что при введении большого количества металла, матрица остается аморфной и устойчивой. Этот факт позволяет менять содержание металла в пленках в достаточно широких пределах, варьируя тем самым различные свойства получаемых нанокомпозитов, например, электропроводность, что обуславливает перспективность этих пленок для различных областей электроники и определяет актуальность их исследований.

Целью данной работы является определение возможности образования соединений углерода, кремния и легирующего металла. В связи с этим был проведен анализ фазовых диаграмм трехкомпонентных систем: углерод-кремний-марганец, углерод-кремний-никель, углерод-кремний-цирконий и углерод-кремний-медь. Фазовые диаграммы позволяют рассмотреть параметры системы с позиций термодинамики. Диаграммы строились в программе FactSage – одной из крупнейших полностью интегрированных вычислительных систем баз данных в химической термодинамике в мире. Она состоит из серии модулей информации, базы данных, расчета и манипуляции, которые обращаются к различным чистым веществам и базам данных решений. Расчеты в программном продукте FactSage были проведены в НОЦ «Нанотехнологии» (Южный федеральный университет). Был проведен термодинамический анализ фазовых диаграмм для вышеупомянутых систем при различных температурах и давлении 10^5 Па. Рассматривались области диаграмм при соотношении компонентов: углерод – 0,7-0,9; кремний – 0,3-0,1; металл – 0,01-0,2 мольные доли.

На диаграмме углерод-кремний-марганец при 700 °С в исследуемой области наблюдается присутствие C, SiC и Mn_7C_3. При температуре 1100 °С кроме углерода и карбида кремния возможно образования силицида марганца Mn_5Si_3, при более высоком содержании марганца и более низком содержании кремния преимущественно образуются карбид и силицид марганца указанного состава, а не карбид кремния. Для никеля при 600 °С на диаграмме углерод-кремний-марганец в рассматриваемой области преимущественно образуется C, SiC и Ni_5Si_2. При более высоком содержании металла и более низком содержании кремния можно встретить силицид никеля Ni_3S_i и чистый никель, карбид кремния при этом не образуется. При температуре 1000 °С вместо Ni_5Si_2 образуется Ni_2Si. При расчетных температурах карбиды никеля не образуются. На диаграммах углерод-кремний-цирконий и при 900 °С и при 1300 °С в исследуемом диапазоне соотно-

шения компонентов можно обнаружить C, SiC и ZrC. Силициды циркония различного состава появляются лишь при содержании углерода в системе не более 0,5 мольных доли. Исходя их фазовых диаграмм углерод-кремний-медь, медь при температурах 600-1000 °C не вступает в химические реакции с углеродом и кремнием, карбидов не образует, образование силицидов различного состава возможно лишь при содержании кремния более 0,5 мольных доли.

Таким образом, по фазовым диаграммам углерод-кремний-металл определено, что никель и медь в диапазоне температур 600-1000 °C не являются карбидообразующими. Образование силицидов меди при содержании кремния менее 50 мольных % не происходит. Марганец и цирконий являются карбидообразующими металлами в исследуемом диапазоне температур. Силициды циркония различного состава образуются при содержании углерода не более 50 мольных %. При высоком содержании марганца и низком содержании кремния преимущественно образуются карбид и силицид марганца, а не карбид кремния.

Рассмотренные системы могут применяться для формирования нанокомпозитных материалов стойких к воздействию агрессивных сред, обладающих заданными свойствами.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Соглашение №14.575.21.0126 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57517X0126).

Список литературы

1. Franta D. Optical properties of diamond-like carbon films containing SiO_x / D. Franta [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2003. – V. 12. – N. 9. – P. 1532-1538;
2. Senkevich J. J. Compositional control of plasma enhanced chemical vapor deposited diamond-like carbon/SiO_2 nanocomposite thin films / J. J. Senkevich [et al.] // Applied Physics A: Materials Science and Processing. – 2003. – V. 77. – N. 3. – P. 581-584;
3. Yang W. J. Microstructure and tribological properties of SiOx/DLC films grown by PECVD [Text] / W. J. Yang [et al.] / Surface and Coatings Technology. – 2005. – V. 194. – N. 1. – P. 128-135.

Получение тонких пленок и порошков TiO_2 как фотоактивных материалов, допированых наночастицами металлов, и исследование их характеристик

Алиев С. А.[1], Трофимов Н. С.[1], Чехлова Т. К.[1], Заев Д.[1], Михаленко И. И.[1]

[1]РУДН

Эл. почта: altersam@mail.ru

Диоксид титана является эффективным фотокатализатором для целого ряда химических реакций [1]. Его фотокаталитические свойства обусловлены формированием на

поверхности в процессе освещения ряда радикалов или парамагнитных центров (ПЦ), которые способны вступать во вторичные реакции. Наноструктурированный диоксид титана в структурной форме анатаза позволяет увеличить выход реакции фотоокисления на несколько порядков за счет увеличения площади удельной поверхности.

Большая площадь удельной поверхности диоксида титана в структурной форме анатаза делает его перспективным материалом также для создания эффективных солнечных фотоэлементов, так как при наноструктурировании увеличивается поглощательная способность материала.

С целью расширения спектральной полосы поглощения и увеличения амплитуды поглощения материала для увеличения фотокаталитической активности используют легирование диоксида титана наночастицами металлов. Кроме того, введение таких частиц в композитную пленку приводит к появлению качественно новых физических свойств [2].

В работе исследуются спектры поглощения и скорость фоторазложения загрязнителей пленок и порошков диоксида титана, содержащих наночастицы никеля, железа, меди, золота, родия, иридия и кобальта, изготовленных по гель технологии. В зависимости от температуры отжига при формировании пленок наблюдались существенные изменения спектров, а именно возникали дополнительные пики поглощения разной интенсивности и сдвиг края зоны пропускания. Эти изменения обусловлены изменением структуры пленок, а также агрегацией наночастиц. Для каждого случая характерно наличие особенных пиков поглощения, отличных от полученных ранее для гель-пленок с добавлением наночастиц золота [3].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния наночастиц различных металлов на свойства пленок диоксида титана, изготовленных гель-методом. Гель-метод [4] позволяет получать пленки с содержанием наиболее востребованной для различных применений модификацией анатаза до 100%. Ультрадисперсные аморфные порошки TiO_2 с введенным $CuCl_2$-$FeCl_3$-$CoCl_2$-$NiCl_2$ тестировались на фоторазложение красителя на красителях (МО) до и после кристаллизации ксерогелей Cu, Fe, Co, Ni / TiO_2.

Получение TiO_2 производилось из тетрабутоксида титана (ТБТ) в присутствии триэтиленгликоля (ТЭГ) и н-бутанола. Время синтеза составляло 3-5 мин, через 2 мин в смесь ТБТ+ТЭГ добавляли н-бутанол. Использовалось соотношение ТБТ:ТЭГ = 1:1. Пленки диоксида титана формировались на подложках для фотопластинок методом вытягивания из раствора и последующего отжига. Модификация наночастицами меди, кобальта, железа, золота, родия, ирридия и никеля осуществлялась добавлением солей металлов в раствор. Из полученных растворов вытягивались пленки и отжигались при температурах 120ºС и 450ºС.

Наночастицы меди и кобальта увеличили интенсивность поглощения сформированных при температуре 120ºС пленок в коротковолновой части видимого диапазона. При добавлении никеля и железа спектр практически не изменяется. При добавлении наночастиц железа и никеля и отжиге при 450ºС спектр поглощения пленки диоксида титана смещается в видимую область. Сдвиг пика и изменение его ширины, по-видимому, связано с образованием агломератов, а также изменением размера и формы частиц. Более

интенсивное поглощение пленки без добавления наночастиц при увеличении температуры отжига говорит нам о присутствии диоксида титана в форме анатаза.

Зависимости степени фоторазложения КР *нелинейные*. Кинетика фоторазложения МО не описывается уравнениями первого и второго порядка. Для характеристики фотоактивности мы выбрали эмпирическое степенное уравнение. После его дифференцирования можно рассчитать начальную активность как скорость при минимальном времени облучения 1 минута, *используя всю кинетическую кривую*. Действительно, получается хорошее спрямление. Начальная активность образца с железом *в 3,5 раза выше* по сравнению с TiO_2. Отметим, что остальные ионные формы металлов также увеличивает фотоактивность, но в меньшей степени. При длительном облучении (5 и 10 минут) самым активным остаётся образец содержащий ион Fe^{3+}.

Список литературы

1. Fujishima A, Hashimoto K and Watanabe T 1999 TiO_2 Photocatalysis. Fundamentals and Applications (Tokyo: BKC Inc.);
2. Karpov S V and Slabko V V 2003 Optical and photophysical properties of fractal-structured metal sols (Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS);
3. S.A. Aliev, N.E. Nikolaev, N.S. Trofimov and T.K. Chekhlova. Properties of TiO_2 films with gold nanoparticles // Journal of Physics: Conference Series 737 (2016) 012036;
4. Yu. M. Evtushenko, S.V. Romashkin, N.S. Trofimov, T.K. Chekhlova. Optical Properties of TiO_2 Thin Films // Physics Procedia, V. 73, 2015, p. 100–107.

Ионизационный сенсор газа с чувствительным элементом на основе углеродных наноструктур с развитым рельефом

Резван А. А.[1], Климин В. С.[1]

[1]ЮФУ

Эл. почта: arezvan@sfedu.ru

В настоящее время вопросы экологии принимают первостепенную важность. В мировой практике накоплен значительный опыт в области отслеживания вредных воздействий деятельности человека на среду обитания. Во всем мире появился как интерес, так и объективные возможности, и потребности во внедрении различных технических и технологических новинок в области экологии. И кроме этого, с развитием промышленности и научно-технического процесса в целом появляются все более жесткие требования к системам мониторинга и защиты окружающей среды. В связи с этим необходима разработка и создание недорогих чувствительных элементов сенсоров газов использующих современные технологий и материалы.

Одними из таковых являются углеродные наноструктуры, обладающие уникальными свойствами и стабильными характеристиками. Благодаря тому, что УНС обладают

устойчивостью к ионизирующим излучениям и гексагональной двумерной одноатомной кристаллической решётке, которая позволяет определять малые концентрации адсорбированного газа, а их электропроводность сильно зависит от внешних факторов: наличия газов и жидкостей, температуры и электрического поля, данный материал является актуальным для формирования чувствительного элемента сенсора.

Экспериментальный макет представляет собой небольшую изолирующую подложку, на которой расположены измерительные электроды, чувствительный элемент и нагреватель, находящиеся на разных сторонах подложки. Нагреватель необходим для дегазации, восстановления чувствительного элемента и поддержания постоянной температуры процессов, протекающих на поверхности полупроводника при хемосорбции газов.

Для формирования сенсора газа в качестве подложки использовался кремний Si, с кристаллографической структурой (100). Подготовка подложек производилась в несколько этапов: обезжиривание, химическая обработка и отжиг. Данный процесс был необходим для улучшения геометрических параметров и качества поверхности используемых пластин для последующей обработки. Далее при помощи метода плазмо химического осаждения из газовой фазы на поверхности подложки был сформирован слой диэлектрика Si_3N_4, благодаря которому были сформированы изолирующие стенки сенсора. После чего на полученную структуру был нанесен каталитический слой никеля Ni, данный процесс был выполнен при помощи магнетронного распыления на установке. При помощи методов нанолитографии поверхностный слой никеля был модифицирован и был преобразован в массив вертикально-ориентированных наноразмерных вискеров. Углеродная наноструктура представляла собой пленку графена, нанесенную методом плазохимического осаждения из газовой фазы. После чего поверх чувствительного слоя были сформированы электрические контакты, соединяющиеся с устройством обработки сигнала.

По окончанию экспериментальных исследований разработана конструкция и лабораторно-технологическая инструкция изготовления сорбционного сенсора газа с чувствительным элементом на основе массива вертикально-ориентированных углеродных наноструктур.

В результате было определено, что изготовленный макет резистивного сенсора газов на основе чувствительного элемента, состоящего из углеродной наносистемы обладает чувствительностью к акцепторным молекулам газа NO_2 и донорным молекулам газов NH_3, CO, парам H_2O с различной степенью коэффициента чувствительности зависящего от концентрации. Согласно проведенным экспериментальным оценкам для CH_4, CO_2, CO, при рабочей температуре 300 К и концентрации 0,01 моль/литр, чувствительность составила 63, 135, 5468 соответственно, время срабатывания 0,1 сек; время восстановления 1,0 сек.

Исследование нанокристаллических пленок ZnO для мемристорных структур

Хахулин Д. А.[1], Вакулов З. Е. [1], Томинов Р. В. [1], Смирнов В. А. [1], Чон-Гул Юн[2], Агеев О. А. [1]

[1]ЮФУ

[2]Сувонский университет, Южная Корея

Эл. почта: khakhulin.d.a@gmail.com

1. Введение

В настоящее время в области микро- и наноэлектроники активно развиваются направления, связанные с устройствами, которые позволили бы достичь более высокой производительности элементной базы, не прибегая к дальнейшей миниатюризации [1]. Одним из таких направлений являются энергонезависимые устройства памяти на основе оксидов переходных металлов [2, 3]. ZnO, среди прочих материалов данной группы, привлекателен для задач изготовления мемристора благодаря своей технологичности [4]. Ранее нами затрагивался вопрос изготовления активного слоя устройства из нанокомпозита на основе ZnO [5], и развитием данной идеи служит создание мемристора из одного материала, свойства которого будут изменятся по мере напыления путем добавления примеси и изменения режимов роста пленок.

2. Эксперимент и результаты

Рост нанокристаллических пленок ZnO с примесями In, Pd, Sn и Ga осуществлялся на модуле импульсного лазерного осаждения (ИЛО) Pioneer 180 (Neocera, США) нанотехнологического комплекса NANOFAB NTK-9 (НТ-МДТ, Россия). Измерения электрических параметров проводились на Keithley 4200-scs (Keithley Instruments, США), а морфология и толщина пленок исследовались на системе атомно-силовой микроскопии NT-MDT Solver (NT-MDT, Россия) и сканирующем электронном микроскопе Nova Nanolab 600 (FEI, Нидерланды). Опыты показали, что при толщинах пленок от 200 до 500 нм удельное сопротивление изменяется слабо. Так, для пленок ZnO:Ga удельное сопротивление в указанном диапазоне толщин составляет ~40 Ом·см. При дальнейшем утоньшении пленки удельное сопротивление резко возрастает в 5-7 раз. Так, если для ZnO:In удельное сопротивление в диапазоне толщин от 180 до 400 нм практические не изменяется и составляет ~0,1 Ом·см, то при толщине пленки 150 нм удельное сопротивление составляет 0,7 Ом·см. Так же было проверено наличие переключения сопротивления в полученных пленках. Измерения показали, что переключение практически отсутствует в пленках ZnO:Ga, в то время как наибольшее соотношение сопротивлений в низко- и высокоомновмном состояниях (~10) характерно для ZnO:Pd.

3. Заключение

Таким образом, нами было исследовано, как изменяется удельное сопротивление нанокристаллических пленок ZnO в зависимости от используемой примеси и их толщины. Так же было измерено переключение сопротивления в изготовленных пленках. Полученные результаты позволят изготовить мемристор активный слой которого и прово-

дящие слои будут изготовлены из нанокристаллических пленок ZnO, различающихся по своему составу и электрофизическим свойствам.

Список литературы

1. Cavin R.K. Science and Engineering Beyond Moore's Law / Cavin R.K., Lugli P., Zhirnov V. V. // Proceedings of the IEEE – 2012. – Т. 100 – № Special Centennial Issue – С.1720–1749;
2. Akinaga B.H. Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides / Akinaga B.H., Shima H. – 2010. – Т. 98 – № 12 – С.2237–2251;
3. Zidan M.A. The future of electronics based on memristive systems / Zidan M.A., Strachan J.P., Lu W.D. // Nature Electronics – 2018. – Т. 1 – № 1 – С.22–29;
4. Ageev O.A. Effect of the processes in the laser ablation plume on the resistivity and morphology of nanocrystalline ZnO films / Ageev O.A., Dostanko A.P., Zamburg E.G., Konoplev B.G., Polyakov V. V., Cherednichenko D.I. // Physics of the Solid State – 2015. – Т. 57 – № 10 – С.2093–2098;
5. Khakhulin D.A. Resistive switching in ZnO/ZnO:In nanocomposite / Khakhulin D.A., Vakulov Z.E., Smirnov V.A., Tominov R. V, Yoon J.-G., Ageev O.A. // Journal of Physics: Conference Series – 2017. – Т. 917 – № 9 – С.92008.

Исследование процессов локального ионно-стимулированного осаждения углерода для формирования зондов для нанодиагностики

Коломийцев А. С.[1], Шандыба Н. А.[1], Панченко И. В.[1], Лисицын С. А.[1]

[1]ЮФУ

Эл. почта: askolomiytsev@sfedu.ru

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) в настоящее время являются одним из основных методов получения информации о структуре и локальных свойствах поверхности наноструктурированных материалов [1]. Точность и разрешающая способность исследований методами СЗМ во многом определяется параметрами используемых зондов. Для специализированных методик СЗМ, таких как ближнепольная оптическая микроскопия, микроскопия боковых стенок (CD AFM) или рамановская спектроскопия в режиме зондового усиления применяются зонды специализированной формы, изготовление которых технологически сложно, что приводит к ограниченности и неоптимальности их параметров [1, 2]. Используя современные методы наноструктурирования можно формировать острия зондов сложной формы практически без ограничения их формы и размеров. Одним из наиболее перспективны на сегодняшний день методов формирования наноразмерных структур является ионно-стимулированное осаждение из газовой фазы с использованием фокусированного ионного пучка (ФИП). Разрешение метода определяется диаметром ФИП, который составляет 7-10 нм [2, 3]. Целью данной работы является исследование процессов ионно-стимулированного осаждения углерода для формирования острия зондов для специализированных методик СЗМ.

Экспериментальные исследования в работе проводились с использованием растрового электронного микроскопа с системой ФИП Nova NanoLab 600 (FEI Company) и были реализованы в 2 этапа. Сначала были исследованы закономерности влияния технологических параметров ФИП, таких как ток ионного пучка, время воздействия пучка в точке, ускоряющее напряжение на геометрические параметры наноразмерных структур углерода. После этого были сформированы экспериментальные образцы зондов для CD AFM с улучшенными характеристиками по сравнению со стандартными зондами. В качестве основы были использованы чипы стандартных АСМ-зондов NSG-10 со сломанными или изношенными остриями. Ионно-стимулированное осаждение острия зонда производилось при ускоряющем напряжении ФИП – 30 кэВ, токе ионного пучка 30 пА, времени воздействия ионного пучка в точке – 1 мс. Таким образом, было сформировано острие зонда высотой 4,5 мкм, шириной 350 нм, длиной выступов по 75 нм и радиусом закругления выступов – около 20 нм. Общее время формирования острия составило 12 мин. Применяемая методика позволяет формировать острия зондов с параметрами, требуемыми для конкретного образца, что повышает точность исследований и позволяет получить максимум информации.

Анализ полученных АСМ-изображений ступеньки фоторезиста ПММА толщиной 1 мкм, полученных с использованием сформированного методом ФИП зонда, показал среднеарифметическую шероховатость боковой грани на уровне 8,5 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта Южного федерального университета №ВнГр-07/2017-26.

Список литературы

1. Неволин В.К., Зондовые нанотехнологии в электронике, М.: Техносфера., 160 с., 2006 г.;
2. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Konoplev B.G., Microelectronics reliability, Vol. 55, P. 2131–2134, 2015;
3. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Serbu N.I., Smirnov V.A., Russian Microelectronics, Vol. 41, № 1, P. 41–50, 2012.;

Влияние условий выращивания методом MOCVD на однородность по толщине эпитаксиальных слоёв GaInAsP, полученных на InP

Маричев Артем[1], Левин Р. В.[1], Пушный Б. В.[1], Гагис Г. С.[1], Васильев В. И.[1], Бер Б. Я.[1], Попова Т. Б.[1], Казанцев Д. Ю. [1]

[1]ФТИ

Эл. почта: segregate1@yandex.ru

Твёрдые растворы $Ga_{1-x}In_xAs_yP_{1-y}$ с составами x = 0.79–0.84, y = 0.3–0.47 изопериодические с InP являются подходящими материалами для фотоэлектрических преобразователей в системах беспроводной передачи энергии включающих так же твердотельный

YAG-лазер с рабочей длиной волны 1064 нм. Для большинства приборных структур требуются слои, состав которых остаётся постоянным по толщине. Градиент содержания компонентов по толщине слоя не должен возникать самопроизвольно и бесконтрольно, поскольку это может привести как к нежелательному изменению свойств слоя, так и к появлению кристаллических дефектов, снижающих эффективность прибора.

В данной работе эпитаксиальный рост осуществлялся на установке AIX200 фирмы AIXTRON при температуре 600°C и пониженном давлении 0.1 атмосферы. В качестве газа-носителя применялся водород с точкой росы не выше -100°C, общий поток водорода составлял 5 л/мин. Структуры выращивались на подложках InP(001):Sn n = (1-3)·10^{18} $см^3$, разориентированных на 4°. Перед получением эпитаксиальных слоёв GaInAsP выращивались буферные слои InP толщиной до 500 нм. В качестве прекурсоров элементов третьей группы использовались триэтилгаллий TEGa и триметилиндий TMIn, находящиеся при температуре 17°C, в качестве прекурсоров элементов пятой группы использовались арсин AsH_3 и фосфин PH_3. Эпитаксиальные слои $Ga_{1-x}In_xAs_yP_{1-y}$ выращивались в диапазоне составов x = 0.86 – 0.87, y = 0.07 – 0.42. Скорость роста эпитаксиальных слоёв определяется в основном суммарным потоком прекурсоров элементов третьей группы, который для образцов, полученных в данной работе, оставался постоянным и составлял III = 20 мкмоль/мин. Постоянным было отношение суммарных потоков прекурсоров элементов пятой и третьей групп V/III = 87. Полученные слои имели толщины 700 – 900 нм. Для полученных образцов были измерены составы на рентгеновском микроанализаторе «Camebax», дающем усреднённое значение на глубине до 500 нм от поверхности слоя, по измеренным составам были рассчитаны значения несоответствия параметра решётки (НПР) f (без учёта деформаций) с использованием данных из [1]. Изменение концентраций компонентов In, Ga, As и P по толщине слоя было исследовано методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

В случае НПР $|f| > 1\cdot10^{-3}$, содержание мышьяка y в подрешётке пятой группы монотонно увеличивалось от границы с буферным слоем InP к поверхности на 0.03 – 0.06 атомных доли, в то время как доли элементов третьей группы x в соответствующей подрешётке оставались постоянными. Для образца с составом $Ga_{0.15}In_{0.85}As_{0.3}P_{0.7}$ и расчётной f = -1·10^{-3} изменение величины y по толщине происходило в пределах менее 0.02 атомных долей.

Таким образом, для образцов, полученных в данной работе при одинаковых температуре, давлении, суммарном потоке прекурсоров элементов третьей группы III и соотношении V/III, наблюдалась зависимость однородности слоёв по толщине от степени согласования растущего слоя GaInAsP с InP. Полученные данные позволяют сделать вывод, что в случае, когда потоки прекурсоров устанавливаются так, что осаждающийся слой на начальных стадиях роста хорошо согласован с предыдущими слоями структуры, изменения состава по мере осаждения слоя практически не происходит. В случае наличия НПР между осаждающимся слоем и поверхностью роста, изменение содержания компонентов пятой группы в твёрдом растворе может быть вызвано возникающими упругими деформациями. Подобный эффект наблюдался ранее для твёрдых растворов InAsPSb, получаемых на подложках InAs [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-30035). Измерения ВИМС и рентгеновский микроанализ проводились с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), поддерживаемом Минобрнауки.

Список литературы

1. Vurgaftman I., Meyer J. R. and Ram-Mohan L. R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys, J. App. Phys, 89, 5815-5875, 2001;
2. Vasil'ev V. I., Gagis G. S., Levin R. V., Kuchinskii V. I., Deryagin A. G., Kazantsev D. Yu., Ber B. Ya.. A Study of Transition Regions in InAsPSb/InAs Heterostructures Grown by MOVPE. Tech. Phys. Lett. 43, 905-908, 2017.

Модификация поверхности оконного стекла для изготовления солнечных элементов

Осипов Н. А.[1], Авдеев С. П.[1], Гусев Е. Ю.[1]

[1]ЮФУ

Эл. почта: trey3282@gmail.com

Благодаря интенсивно развивающемся микро — и нанообластям науки и техники в начале нашего столетия можно отметить, что поиски человечества в получении эффективных средств аккумуляции солнечной энергии начинают сбываться. Из сообщения директора одной из компаний по производству прозрачных солнечных панелей [1], в современном мире около 80% производимого стекла расходуется на окна зданий и только 2% – на солнечные панели. Одно из важных достоинств прозрачных солнечных панелей заключается в том, что панель преобразует часть солнечной энергии в электрическую энергию, благодаря этому помещения нагреваются меньше, тем самым уменьшается энергопотребление на поддержание нормального микроклимата.

Особое внимание в производстве солнечных элементов необходимо уделить поверхности и составу оконного стекла. Примерный химический состав оконного стекла: SiO_2 70-73%; Na_2O 13-15%; CaO 8-10%; MgO 1-4%; Al_2O_3 0,5-1%; K_2O ≥1%; SO_3 ≥0,5%; Fe_2O_3>0,1% [2]. Из элементного состава стекла видно, что компоновка стекла решает задачи технологичности производства (плавление, вязкость и т.д.) и практически не оставляет возможность формирования солнечных элементов на таком стекле. Поэтому в производстве используются дорогие типы стекол в которых отсутствуют нежелательные элементы, например, щелочеобразующие такие как натрий и калий.

В работе рассматриваются вопросы изменения приповерхностного слоя оконного стекла при помощи электроннолучевой обработки. Из работ [3, 4] было установлено, что приповерхностный слой стекла после обработки её электронным лучом изменяется. Щелочные элементы удаляются из поверхностного слоя материала, нарушенный слой стекла переплавляется и возможен процесс перестраивания стеклокаркаса поверхности.

Модификация поверхности стекла проводилась электронно-лучевым плавлением в вакууме. Исследование оптических параметров поверхности до и после электронно-лучевой обработки (ЭЛО) проводилось методом эллипсометрии. Исходное оконное стекло подготавливалась по стандартной технологии обезжиривания. В результате получены образцы с Rz=0,05±0,01 мкм. ЭЛО образца проводилась в специализированной вакуумной установке при энергии ленточного луча 2-2,5 кэВ и плотностью тока 50-100 мА/см^2, при этом часть образца закрывалась металической пластиной.

Измерения проводились на лазерном фотоэлектрическом эллипсометре ЛЭФ-3М при длине волны 632,8 нм и углах падения 45° и 54° для трех областей: исходной поверхности образца, области после нагрева и области после электронно-лучевой обработки.

Анализ оптических параметров поверхности стекла: показателя преломления и глубины модифицированного слоя, проводился по методикам, описанным авторами [5].

Обобщая полученные результаты можно утверждать, что наблюдается изменение поверхностного слоя после электроннолучевой обработки. Показатель преломления снижается на 2-2,5 %, причем толщина приповерхностного слоя снижается почти на половину.

Исследование проводилось с использованием оборудования научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Южного федерального университета (грант ВнГр-07/2017-02).

Список литературы

1. Прозрачные солнечные панели могут в скором времени заменить обычные оконные стекла./ https://ecotechnica.com.ua/technology/204-prozrachnye-solnechnye-paneli-mogut-v-skorom-vremeni-zamenit-obychnye-okonnye-stekla.html;
2. Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов. М:, Стройиздат, 1983, 432 с.;
3. Авдеев С.П., Кравченко А.А., Гусев Е.Ю. Влияние электронно-лучевой обработки на параметры фотоэмитирующих структур и фактор шума МКП // Прикладная физика. 2007. –№3. –С. 67-72;
4. Авдеев С.П., Петров С.Н., Серба П.В., Гусев Е.Ю. Повышение механической и хи-мической устойчивости поверхности оптического стекла боролантановой группы.// Прикладная физика. 2010. №3. С. 140 142;
5. Пшеницин В.И., Абаев М.И., Лызлов Н.Ю. Эллипсометрия в физико-химических исследованиях. Л.: Химия, 1986 – 152 с.

Проводящие высокоаспектные зонды с Pt/C нановискерами для изучения поверхностного потенциала объектов сложной формы методом «Кельвин проб»

Жуков М. В.[1,2], Комиссаренко Ф. Э.[1,3]

[1]ИТМО
[2]ИАП РАН
[3]СПБАУ РАН

Эл. почта: cloudjyk@yandex.ru

Зонды с углеродными нановискерами (НВ) и пучковые технологии их формирования известны уже давно [1, 2]. Данная модификация зондов позволяет повышать качество атомно-силовых изображений при изучении сложных объектов благодаря высокому аспектному отношению НВ (отношению длины к диаметру) и малому размеру закругления вершины НВ [3, 4].

Однако применение НВ в таких методах сканирующей зондовой микроскопии, как электростатическая силовая микроскопия, емкостная микроскопия и микроскопия контактной разности потенциалов (Кельвин проб), затруднено из-за низких проводящих свойств аморфных углеродных НВ.

Таким образом, целью данной работы являлось формирование проводящих зондов с нановискерами, их тестирование в микроскопии контактной разности потенциалов (Кельвин проб) и сравнение со стандартными проводящими зондами.

В данной работе на вершинах стандартных зондов формировались НВ, имеющие иной состав (Pt/C), в который входит платина (около 30-40 %), придающая НВ гидрофильные [5] и проводящие свойства. Для формирования зондов с металлуглеродными Pt/C нановискерами использовался двухлучевой электронно-ионный микроскоп CrossBeam Neon 40 (Carl Zeiss, Германия) с системой напуска газов-перкурсоров ($C_9H_{16}Pt$). Для изучения тестовых структур методом Кельвин проб использовался микроскоп Ntegra Aura (NT-MDT, Россия). В качестве зондов использовались проводящие стандартные зонды (W2C, НТ-МДТ) и стандартные зонды (NSG01, НТ-МДТ) со сформированными на их вершинах Pt/C вискерами. Характерный размер НВ составил около 700-800 нм в длину при диаметре около 40-60 нм.

В качестве тестовых структур использовались:

- Золотая подложка, нанесенная термическим распылением на Si основу со сформированными на ней методом фотолитографии Pt крестовидными структурами (Si-Au-Pt);

- Золотая подложка, нанесенная термическим распылением на Si основу со сформированными на ней методом фотолитографии ITO (Indium tin oxide, оксид индия-олова) крестовидными структурами (Si-Au-ITO).

При исследовании структур Si-Au-Pt было обнаружено улучшение разрешения изображения при использовании зондов с НВ (латеральное разрешение ~110±20 нм при отображении ступеньки Au-Pt) по сравнению со стандартными зондами (~800±150 нм), однако выявлен худший контраст (зонд с НВ ~ 80 мВ, стандартный зонд ~ 100 мВ).

Предположительно это может быть связано с идентичным чувствительным материалом НВ и материалом подложки (Pt).

Проведены исследования на структурах (Si-Au-ITO), которые показали улучшение контраста (~100 мВ) и разрешения (~250±50 нм при отображении ступеньки Au-ITO) при использовании зондов с НВ по сравнению со стандартными зондами (контраст ~60 мВ и разрешение ~700±100 нм). Тем не менее, стоит отметить, что в обоих случаях качество было хуже, чем в случае измерения структуры (Si-Au-Pt).

Таким образом, при работе зондами с нановискерами в Кельвин проб режиме замечено улучшение качества изображений на таких структурах, как (Si-Au-ITO) и (Si-Au-Pt), что может быть связано с формой и составом сформированных на вершинах стандартных зондов Pt/C металлорганических НВ. Разработанные зонды с проводящими НВ для зондовой микроскопии могут потенциально применяться для диагностики материалов в таких областях, как наноэлектроника, материаловедение, энергетика, машиностроение и т.п.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (17-19-01532), государственного задания Федерального агентства научных организаций (АААА-А16-116041110123-5), ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

Список литературы

1. В.А. Быков. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии.// Микросистемная техника, №1, – С. 21-32. – 2000;
2. A. G. Baker and W. C. Morris. Deposition of metallic films by electron impact decomposition of organometallic vapors. // Review of Scientific Instruments, Vol. 32. – P. 458. – 1961;
3. J. D. Beard and S. N. Gordeev. Fabrication and buckling dynamics of nanoneedle AFM probes. // Nanotechnology, 22 (17), – P. 175303 (8 pp). – 2011;
4. M. V. Zhukov, I. V. Kukhtevich, V. V. Levichev, I. S. Mukhin and A. O. Golubok. Specialized probes with nanowhisker structures for scanning probe microscopy. // J. Phys.: Conf. Ser. 541 (1), – 012042 (6pp). – 2014;
5. M. V. Zhukov, I. S. Mukhin, V. V. Levichev, and A. O. Golubok. Investigation of the Contrast Inversion Effect on Hydrophilic Surfaces Using Pt/C Whisker Probes in a Scanning Force Microscope. // Technical Physics Letters, Vol. 41, No. 2, – pp. 149-152. – 2015.

Усиление скорости спонтанной эмиссии в планарных металл-органических структурах

Морозов К. М.[1,2], Иванов К. А.[1,2], Selenin N.[3], Mikhrin S.[3], de Sa Pereira D.[4], Menelaou C.[4], Monkman A. P.[4], Калитеевский М. А.[1,2,5]

[1]СПбАУ РАН
[2]ИТМО
[3]Innolume GmbH, Dortmund, Germany
[4]University of Durham, UK
[5]ФТИ

Эл. почта: m1327monroq@yandex.ru

Периодические металл-диэлектрические структуры – перспективный класс фотонных структур, с помощью которых уже было продемонстрировано множество эффектов, позволяющих манипулировать взаимодействием света и вещества на микроуровне [1, 2] в том числе изменение скорости спонтанной эмиссии [3].

В нашем исследовании было экспериментально продемонстрировано явление увеличения скорости спонтанной эмиссии органической молекулы CBP (N,N′-Dicarbazolyl-4,4′-biphenyl), излучающей в фиолетовом диапазоне (на длинах волн 370-420 нм). С помощью системы Kurt. J. Lesker Spectros, путем термического осаждения были изготовлены две периодические структуры (5 пар слоев), состоящие из двух материалов: серебра и активного органического материала CBP на подложке из сапфира с различными толщинами слоев (15 нм CBP/ 15 нм серебро; 30 нм CBP/ 15 нм серебро). Процесс затухания интенсивности флуоресценции полученных образцов был измерен с помощью методики TCSPC.

Исследование показало, что в случае обоих структур, скорость затухания интенсивности флуоресценции молекулы CBP была увеличена примерно в 10 раз по отношению к случаю отдельного слоя CBP. Данное увеличение скорости затухания обусловлено эффектом Парселла.

Список литературы

1. Stefan Enoch, et. al., "A Metamaterial for Directive Emission", Phys. Rev. Lett.89(21), 213902, 2002;
2. V. G. Veselago, "Electrodynamics of materials with negative index of refraction", Physics-Uspekhi 46(7) 764–768, 2003;
3. Martin Kuttge, et.al., "Ultrasmall mode volume plasmonic nanodisk resonators", Nano Lett. 10, 5: 1537–1541, 2010.

Modification of CNT arrays morphology by nanosecond laser treatment

Ryazanov R. M.[1,2], Gerasimenko A.Yu.[1], Kitsyuk E. P.[2], Pavlov A. A.[3], Savelyev M. S.[1]

[1]MIET, Russia, Russia
[2]SMC "Technological Centre"
[3]INME RAS

Эл. почта: r.m.ryazanov@gmail.com

1. Introduction

The most technologically advanced method for obtaining carbon nanotube arrays on a local area is their catalytic synthesis, in which the catalyst topology determines the future location of CNT arrays. At the same time, CNTs, synthesized by this method, are characterized by a complex morphology of the arrays and contain many defects. For further processing in order to improve various electro-physical characteristics, plasma [1], liquid treatment and high-temperature [2] annealing can be used, however, these methods do not allow acting locally on the sample and are often not applicable to the already formed structures. In the framework of this paper a method for structuring CNTs by laser radiation of various powers is shown, and its effect on the morphology of the arrays is investigated.

2. Experiment

The CNT arrays were synthesized by PECVD method in C_2H_2, Ar and NH_3 environment at temperature 600 °C. CNTs synthesized on a catalytic pair of Ti / Ni layers of two thicknesses: 10/2 nm and 25/5 nm respectively were used for the studies. The height of the array and the average diameter of the CNTs depended on the catalyst used. A solid-state pulsed Nd:YAG laser operating at a fundamental wavelength of 1064 nm was used as the radiation source, the second harmonic at 532 nm being formed by a nonlinear crystal. The pulse duration was 16 ns. To mount the power of the radiation incident on the sample (0,47-4,16 μJ) the rotary prism of Glan was used.

The effect of laser action of equal power on CNT arrays with different parameters was significantly different. For example, for thin CNTs synthesized on a 10 nm Ti / 2 nm Ni catalyst, even the effect of complete removal of the array at the epicentre of the laser beam was observed. CNTs grown on a 25 nm Ti / 5 nm Ni catalysts, even at the highest energy of the laser pulse, were retained on the substrate, but they significantly changed their morphology. It is possible to distinguish up to 3 zones of laser radiation action: the epicenter zone with energy density N/S=0.89 J/cm^2, the mean radius (N/S=0.38 J/cm^2) and the far radius (N/S=0.12 J/cm^2). In these zones, the effects of laser action on the array differ drastically.

By varying the energy densities and analysing the points at different points of laser action radius several effects were obtained: random disordering of the local CNT regions, the complete removal of the all CNTs from the substrate, formation of a single cone of several CNTs, the weeding, the straightening and separation of the CNT array into separately standing nanotubes.

Due to the locality of the action, the absence of structure-contaminating treatments and the high precision process, the method of laser structuring of CNTs can be used at the final stage of structure creation.

It is promising to use such a technique for treating CNTs to improve their structural perfection, to purify them of amorphous carbon, to improve the electro-physical and field emission characteristics, and to form individual topological elements from CNTs.

3. Acknowledgments

This study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project no. 16.9007.2017/8.9.

Список литературы

1. Chen G. Neupane S. Li W. Chen L. Zhang J., An increase in the field emission from vertically aligned multiwalled carbon nanotubes caused by NH3 plasma treatment, Carbon, 2012;
2. Kim B. Kim J. Park J., Effects of Al interlayer coating and thermal treatment on electron emission characteristics of carbon nanotubes deposited by electrophoretic method, Nanoscale Research Letters, 236, 2014.

Unconventional magnetic behavior of polymer composite with single and multilayer graphene flakes

Sitdikov R. R.[1,2], Semenikhin P. V. [2], Volkov M. P.[2], Ionov A. N.[2], Nikolaeva M. N.[3]

[1]SPbPU, Russia
[2]Ioffe Institute
[3]Institute of Macromolecular Compounds, Russia

Эл. почта: fzth.marneusk@gmail.com

In recent years interest in composite polymer materials has increased significantly in connection with the development of nanotechnology and the use of nanoparticles as a filler [1]. Magnetic hysteresis loops up to the room temperature, which usually are explained by ferromagnetism, have been observed in nanomaterials of such typical bulk diamagnetics as Ag, Au, Gd, Pd, Rh, etc and also in various forms of carbon nanostructures including graphene, nanotubes, nanoflakes, nanodots etc. Polymeric composites (PC) on the base of different polymers with embedded nanoparticles represent a new class of flexible and printable materials. The properties of PC depend on the kind, size and shape of embedded nanoparticles, as well as their interactions with the polymer matrix. All this gives optimistic predictions that PC can be widely used in engineering applications, for example, in spintronic devices, in electronics [2], in magnetic systems [3] and even for superconductive devices working at room temperature [4]. Most of researchers consider that it is possible to obtain different magnetic behaviors of PC with graphene flakes (GF) in accordance with the spin orientations of their atoms and number

of graphene layers in carbon material: paramagnetic, ferromagnetic, antiferromagnetic and superconductivity hysteresis behaviors.

Recently, we investigated magnetic properties of single and multilayer graphene flakes (GF) which were introduced in polystyrene (PS) by two methods namely: (i) solution mixing where GF were introduced in polystyrene mechanically, i.e. as a filler and (ii) in situ polymerization where polymer chains and GF were linked by covalent bonds. Graphene flakes were produced from natural crystalline graphite by chemical exfoliation. In result of chemical exfoliation reduced graphene flakes (rGF) obtain defects with spin units which may participate in magnetism.

The magnetic moment (M) of GF+PS (GF was about 1 wt % in polystyrene) were measured by a vibrating sample magnetometer in the field range of — 10 T < H < 10 T, and in the temperature range of 5K < T < 400K. Indeed in both (i) and (ii) cases we observed ferromagnetic loops up to room temperature. The M–H loops of polymer composite show a hard magnetic character with a huge coercivity, for example, there are 57000 Oe and 21000 Oe for temperatures 5 and 400 K, respectively.

By using electron spin resonance (ESR), the temperature dependence of the magnetic susceptibility was obtained for GF+PS. ESR was measured on a E-112 “VARIAN” spectrometer. Resonance observed at g-factor equals 2.0031. However, the both PC demonstrated only strong paramagnetic contribution in a temperature range 2.7 – 100 K.

Список литературы

1. S. Kango, S. Kaliab, A. Celli, J. Njuguna,Y. Habibi, R. Kumar, "Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic–inorganic nanocomposites — A review", Progress in Polymer Science 38, pp.1232– 1261 (2013);
2. D. Makarov, M. Melzer, D. Karnaushenko, and O. G. Schmidt, “Shapeable magnetoelectronics”, Applied Physics Reviews 3, pp. 011101-24 (2016);
3. A.A. Komlev, T.L. Makarova, E. Lahderanta, P.V. Semenikhin, A.I.Veinger, T.V. Tisnek, G. Magnani, G. Bertoni, D. Pontiroli, M. Ricco, "Magnetism of aniline modified graphene-based materials", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 415, pp. 45–50 (2016);
4. A. N. Ionov, "Josephson-Like Behaviour of the Current–Voltage Characteristics of Multi-graphene Flakes Embedded in Polystyrene", Journal of Low Temperature Physics 185(5-6), pp. 515–521 (2016).

Особенности АС-проводимости в системе с двумя подзонами пространственного квантования

Дмитриев А. А.[1,2], Дричко И. Л.[1], Смирнов И. Ю.[1]

[1]ФТИ
[2]ИТМО

Эл. почта: denshion@mail.ru

В квантовых ямах при определённом соотношении концентрации носителей заряда и ширины ямы оказываются заполнены две подзоны пространственного квантования, разделённые энергией Δ_{SAS}. В работе исследовалась АС-проводимость в структуре n-GaAs/AlGaAs с широкой квантовой ямой $d_W = 26$ нм, с общей концентрацией носителей $n = 8.14 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$ и холловской подвижностью $\mu_H = 1.2 \cdot 10^6$ см^2 / В·с. В данной структуре заполнены две подзоны пространственного квантования.

Структура была исследована при помощи двух бесконтактных методик — акустической [1] и микроволновой [2]. Акустическая методика позволяет определять АС-проводимость двумерной структуры из одновременно измеренных величин коэффициента затухания поверхностной акустической волны и относительного изменения её скорости [3]. Частотный диапазон этой методики — 30–300 МГц. В микроволновой методике измеряются коэффициент затухания и изменение фазы квази-ТЕМ-волны в копланарном волноводе — эти две величины также определяются АС-проводимостью. Частотный диапазон микроволновой методики существенно шире: 100–1200 МГц. Измерения проводились в диапазоне частот 30–1200 МГц в магнитных полях до 8 Тл при температурах от 1.7 до 12 К в зависимости от мощности вводимого в систему сигнала.

Полученные зависимости АС-проводимости от магнитного поля демонстрируют сложную осцилляционную картину. При помощи Фурье-анализа было выявлено три серии периодичных в обратном магнитном поле осцилляций. Среди них две серии соответствуют осцилляциям Шубникова — де Гааза, частоты которых пропорциональны концентрациям носителей в каждой из подзон ($n_1 = 6.2 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$ и $n_2 = 1.9 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$). Третья серия соответствует так называемым межподзонным осцилляциям, которые наблюдаются в магнитных полях до 1.4 Тл и слабо зависят от температуры. Их физическая природа состоит в следующем. В магнитных полях, для которых Δ_{SAS} оказывается кратным $\hbar\omega_c$, «лестницы» уровней Ландау от двух подзон выравниваются, что приводит к появлению межподзонного рассеяния, что выражается в появлении минимумов на зависимости проводимости от магнитного поля. По положению данных осцилляций в магнитном поле было определено $\Delta_{SAS} = 15.5$ мэВ.

При большой мощности вводимого в систему сигнала наблюдались нелинейные эффекты: по мере увеличения мощности межподзонные осцилляции постепенно изменяли фазу на противоположную. Было обнаружено, что при различных температурах изменение фазы межподзонных осцилляций происходит при разных мощностях. На постоян-

ном токе этот эффект наблюдался Быковым в работе [4], результаты которой были сопоставлены с результатами настоящей работы. В работе [4] обнаруженный эффект объясняли модификацией электронного спектра под действием холловского поля. Также существует интерпретация этого эффекта, связанная с наличием осциллирующей части в неравновесной функции распределения электронов [5]. Теория, объясняющая данный эффект в случае высокочастотной проводимости, на данный момент отсутствует.

В магнитных полях выше 1.4 Тл наблюдается наложение двух серий осцилляций Шубникова — де Гааза, переходящих в более сильных магнитных полях в осцилляции квантового эффекта Холла. В настоящей работе была предпринята попытка разделить вклады от первой и второй подзон и определить в них механизмы низкотемпературной АС-проводимости в режиме квантового эффекта Холла.

Список литературы

1. A. Wixforth, J. P. Kotthaus, G. Weimann, Quantum oscillations in the surface-acoustic-wave attenuation caused by a two-dimensional electron system, Phys. Rev. Lett., 56, 2104–2106, 1986;
2. L. W. Engel, D. Shahar, C. Kurdak, D. C. Tsui, Microwave frequency dependence of integer quantum hall effect: Evidence for finite-frequency scaling, Phys. Rev. Lett., 71, 2638–2641, 1993;
3. Каган В. Д., Распространение поверхностной акустической волны в слоистой системе, содержащей двумерный проводящий слой, Физика и техника полупроводников, 31(4), 478-482, 1997;
4. Быков А. А, Нелинейный магнетотранспорт в квазидвумерной системе с высокой электронной подвижностью, Письма в ЖЭТФ, том 88, выпуск 1, 70–74, 2008;
5. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner, A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, Theory of microwave-induced oscillations in the magnetoconductivity of a two-dimensional electron gas, Physical Review B, 71(11), 115316, 2005.

Распределение электронной плотности наноразмерных структур во внешнем электрическом поле

Дробышев А. А.[1], Головинский П. А.[1,]

[1]ВГТУ
[2]МФТИ

Эл. почта: drobyshevtf@gmail.com

Модель дельта-потенциала получила широкое распространение в атомной и ядерной физике, а также в физике конденсированных сред [1, 2]. В рамках данной модели описана нелинейная ионизация и генерация высоких гармоник в сильных лазерных полях [3, 4], а также туннельный эффект и фоторазрушение отрицательных ионов в присутствии постоянного электрического поля различной конфигурации [5, 6]. Для задачи тун-

нельной ионизации нейтральных молекул получило развитие обобщение метода сшивания асимптотик волновых функций в параболических координатах на сферически несимметричные состояния [7, 8]. Однако в этом случае теория ограничивается рассмотрением локализованных состояний отдельных молекулярных орбиталей. Представление о локализованных состояниях, не учитывающее их возможную интерференцию, лежит в основе описания туннельных эффектов в наноструктурах [9, 10]. Используемая при этом модель единичного дельта-потенциала не описывает возможность делокализации электрона между несколькими областями притяжения, которая характерна для молекулярных и твердотельных систем. Установлено, что делокализация существенно влияет на рассеяние аттосекундных лазерных импульсов двухатомными молекулярными анионами [11] и на интерференцию электронных волн, образующихся при туннельной ионизации электрона из двухъямного потенциала [12]. Влияние делокализации электронной плотности на процессы взаимодействия наноразмерных структур с внешними электрическими полями требует особого рассмотрения. В данной работе, с использованием программного пакета Gaussian и квантово-механических расчетов, построена модель электронной плотности молекулы фуллерена C60. Рассмотрены потенциал и экранировка поля внутри молекулы, локализация электронной плотности и интерференционные эффекты во внешнем электрическом поле.

Список литературы

1. Демков Ю.Н., Островский В.Н., Метод потенциалов нулевого радиуса в атомной физике, Л.: ЛГУ, 240 с., 1975;
2. Киржниц Д.А., Полевые методы теории многих частиц, М.: Либроком, 344 с., 2010;
3. Borzunov S.V., Frolov M.V., Ivanov M.Y., Manakov N.L., Marmo S.S., Starace A.F., Zero-range-potential model for strong-field molecular processes: Dynamic polarizability and photodetachment cross section, Phys. Rev. A., V. 88 (3), P. 033410, 2013;
4. Frolov M.V., Knyazeva D.V., Manakov N.L., Geng J.W., Peng L.Y., Starace A.F., Analytic model for the description of above-threshold ionization by an intense short laser pulse, Phys. Rev. A., V. 89(6), P. 063419, 2014;
5. Donner B., Kleber M., Bracher C., Kreuzer H.J., A simple method for simulating scanning tunneling images, Am. J. Phys., V. 73(8), P. 690-700, 2005;
6. Golovinski P.A., Drobyshev A.A., Atomic photomicroscope in the Coulomb field, Proc. SPIE, V. 7993, P. 799311, 2010;
7. Batishev P.A., Tolstikhin O.I., and Morishita T., Atomic Siegert states in an electric field: Transverse momentum distribution of the ionized electrons, Phys. Rev. A., V. 82, P. 023416, 2010;
8. Tolstikhin O.I., Morishita T., and Madsen L.B., Theory of tunneling ionization of molecules: Weak-field asymptotics including dipole effects, Phys. Rev. A., V. 84, P. 053423, 2011;
9. Головинский П.А., Дробышев А.А., Излучение туннельного электрона на вторичном центре рекомбинации, ЖЭТФ, Т. 145(6), С. 984-990, 2014;
10. Golovinski P.A., Drobyshev A.A., Monte Carlo Computer Simulation of Nonuniform Field Emission Current Density for a Carbon Fiber, JEMAA, V. 6, P. 8-14, 2014;

11. Есеев М.К., Матвеев В.И., Юлкова В.М., Взаимодействие аттосекундного импульса с отрицательными атомарными и молекулярными ионами, ЖТФ, Т. 82(11), С. 130-132, 2012;
12. Golovinski P.A., Drobyshev A.A., Interference in Tunneling Ionization Involving an Electron Bound by Two Short-Range Potentials, Tech. Phys. Lett., V.43(2), P. 231-234, 2017.

Исследование электрофизических свойств пористого анодного TiO_2 модифицированного углеродом в зависимости от условий комбинированной термообработки

Савчук Т. П.[1], Якубов А. О.[1], Дронов А. А.[1], Гаврилин И. М.[1], Лазаренко П. И.[1], Гаврилов С. А.[1]

[1]НИУ МИЭТ

Эл. почта: wewillbe01@gmail.com

Возможность использования полупроводниковых свойств и развитой поверхности наноструктурированного оксида титана в устройствах генерации, хранения и накопления энергии потенциально интересна [1, 2], однако ограничена высоким электрическим сопротивлением данного материала. В последнее время проводится множество исследований углеродосодержащих наноструктур оксида титана. В то же самое время, пористый анодный оксид титана (ПАОТ), модифицированный углеродом, недостаточно изучен, хотя потенциально должен обладать рядом преимуществ за счёт развитой поверхности с высоким аспектным соотношением на поверхности проводящей подложки.

В данной работе проведены исследования электрофизических свойств образцов ПАОТ, сформированных во фторсодержащем электролите на основе этиленгликоля, в зависимости от условий комбинированной термической постобработки. Подобная методика обработки позволяет модифицировать структуру и состав ПАОТ за счёт внедрения углерода, что влияет на электрофизические свойства полученного материала. Источником углерода, в данном случае, являются продукты разложения органического растворителя, входящего в состав электролита, в ходе электрохимического окисления. Электрофизические свойства материала были исследованы двухзондовым методом в инертной атмосфере аргона. Морфология и состав полученных образцов ПАОТ были исследованы методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Список литературы

1. Gavrilin I. M. et al, Improved photoanode structure based on anodic titania nanotube array covered by TiO_2-NPs/nanographite composite layer for ETA-cells, Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, С. 012100, 2016;

2. Gavrilin I. et al, TiO_2 nanotubular arrays as anode materials for li-ion batteries,Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017 IEEE Conference of Russian. IEEE, С. 1394-1396, 2017.

Получение нанокомпозита УНТ-кремний методом плазмохимического осаждения для микро- и наномеханических систем

Гусев Е. Ю.[1], Ильин О. И.[1], Житяева Ю. Ю.[1], Рудык Н. Н.[1]

[1]ЮФУ

Эл. почта: eyugusev@gmail.com

В настоящее время микро- и наноэлектромеханические системы представляют стремительно развивающееся научно-промышленное направление, разрабатываются и изготавливаются новые коммерческие изделия: резонаторы, датчики давления, гироскопы и акселерометры, микрофоны и др. В рамках поверхностной микрообработки в качестве основного структурного материалы выступает поликристаллический кремний. На его основе изготовлен ряд устройств с параметрами материала близкими к теоретическим значениям. Последующее улучшение выходных характеристик связано с необходимостью утяжеления инерциальных элементов путем увеличения толщины структурного слоя и/или локального нанесения дополнительных слоев, а это ограничивается прочностными характеристиками материала с одной стороны, и особенностями, и нормами промышленных технологических процессов с другой. Интересным на наш взгляд может стать использование в качестве материала структурного слоя (дополнительного слоя) – нанокомпозита кремния с массивами углеродных нанотрубок [1].

Цель – исследование режимов получения и параметров нанокомпозита кремния с углеродными нанотрубоками для применения в устройствах микро- и наноэлектромеханических систем.

Выращивание углеродных нанотрубок (УНТ) проводили с использованием модуля плазмохимического осаждения из газовой фазы PECVD (НТ-МДТ, Россия) и никеля толщиной около 10 нм в качестве слоя катализатора при температуре 675°С в потоке аммиака и ацетилена [2, 3]. Получены массивы углеродных трубок диаметром 25-50 нм, длиной от 2 мкм и расстоянием между трубками от 50 до 200 нм.

Далее наносили слой поликристаллического кремния методом плазмохимического осаждения PlasmaLab 100 (Oxford Instruments, Англия) при температуре 650 – 700°С в потоке силана и аргона [4, 5].

Исследование исходных УНТ и полученного нанокомпозита УНТ-кремний проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Nova Nanolab 600 (FEI, Нидерланды).

Получены образцы нанокомпозитов УНТ-кремний. Определены режимы формирования массивов УНТ с расстоянием между трубками от 50 до 200 нм. Установлены режимы осаждения кремния, обеспечивающие заполнение межтрубочного пространства, и получения слоев нанокомпозита с приемлемой плотностью пустот в основании. Проведена оценка геометрических параметров нанокомпозита.

Анализ результатов показал пригодность полученных образцов нанокомпозитов для использования в инерциальных датчиках с целью утяжеления инерционных масс и локального утолщения критических элементов. Их механические параметры требуют отдельного исследования.

Развитие данного направления позволит в рамках поверхностной микрообработки достичь параметров устройств, изготовленных по технологии объемной микромеханики.

Исследование проводилось с использованием оборудования научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета. Работа выполнена при финансовой поддержке Южного федерального университета (грант ВнГр-07/2017-02).

Список литературы

1. Chandrashekar A., Ramachandran S., Pollack G., Lee J.-S., Lee G.S., Overzet L., Forming carbon nanotube composites by directly coating forests with inorganic materials using low pressure chemical vapor deposition, Thin Solid Films, 517, 525–530, 2008;
2. Il’in O.I., Il’ina M.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Ageev O.A., The growth temperature effect on vertically aligned carbon nanotubes parameters, Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 9(1), 92-94, 2018;
3. Klimin V.S., Il'ina M.V., Il'in O.I., Rudyk N.N., Ageev O.A., Research of influence of the underlayer material on the growth rate of carbon nanotube arrays for manufacturing non-volatile memory elements with high speed, Journal of Physics: Conference Series, 917, 092023, 2017;
4. Gusev E.Yu., Jityaeva J.Yu., Bykov Al.V., The formation of multi-axis micromechanical gyroscopes and accelerometers using surface micromachining, Journal of Physics: Conference Series, 929, 012055, 2017;
5. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Jityaeva J.Yu., Kolomiytsev A.S., Bykov Al.V., Fabrication of polycrystalline silicon elements for micro- and nanomechanical accelerometers: Chapter In: Advanced Materials, Mechanical and Structural Engineering: Hong, Seo & Moon (Eds.), London: Taylor & Francis Group: CRC Press: Balkema, 13-16, 2016.

Диэлектрические свойства термопластичного полиимида P-COД в области низких температур

Дао Хонг Тхи [1], Кастро Р. А.[1]

[1]РГПУ

Эл. почта: honghip2012@gmail.com

Полиимиды (ПИ) обладают хорошими физико-химическим свойствами, стабильной структурой, высокой термо- и химической стойкостью, поэтому широко используются в качестве электроизоляционных материалов, в авиационной и космической технике, где зачастую бывают экстремальные условия, в частности, высокие температуры и большие дозы облучения [1, 2]. ПИ активно используют в качестве разделительных мембран с высокой степенью газопроницаемости и селективности [3]. Особый интерес представляют термопластичные ароматические ПИ. Они легко перерабатываются и могут служить матрицей для нанокомпозитов, обладающих улучшенными механическими, электрическими, мембранными свойствами. Целью данной работы выявление особенностей процессов диэлектрической релаксации и переноса заряда в термопластическом полиимиде P-COД в низкотемпературной области.

Дисперсия диэлектрической проницаемости ε' в образцах P-COД характеризуется ее ростом с уменьшением частоты и увеличением температуры, что, по-видимому, связано с проявлением механизмов дипольно-релаксационной поляризации. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь выявляет существование максимума потерь, положение которого меняется с ростом температуры, и указывает на их релаксационный характер в исследуемом интервале температур.

Обнаружена степенная зависимость удельной проводимости от частоты и уменьшение значения показателя степени s с ростом температуры. Перенос заряда является термически активированным процессом. В области температур ниже 203 К обнаружено появление участка металлической проводимости. Причем температура перехода системы из диэлектрического в проводящее состояние определяется и частотой измерительного поля. Полученные результаты объясняются в рамках модели прыжковой проводимости в неупорядоченных системах и могут быть использованы для разработки новых систем записи информации.

Список литературы

1. Bryant, R.G. Polyimides; John Wiley & Sons: New York, 2002;
2. Sroog, C.E., “Polyimides”, In Encyclopedia of Polymer Science and Technology, 1st edition; John Wiley & Sons, Inc., 1969; Vol.11 pp. 247-272;
3. Kase, Y., “Gas Separation by Polyimide Membranes” In Advanced Membrane Technology AApplications; Li, N., Fane, A.G.; Ho, W.S.W.; Matsuura, T., eds.; John Wiley & Sons: New York, 2008; pp 581-598.

Fano Resonances in Halide Perovskite Nanoparticles

Tiguntseva E. Y.[1], Baranov D. G.[2], Pushkarev A. P.[1], Komissarenko F. E.[1], Zakhidov A. A.[3], Shegai T.[2], Makarov S. V.[1]

[1]ITMO University, Russia
[2]Chalmers University of Technology, Sweden
[3]University of Texas at Dallas, USA

Эл. почта: tiga.kate@gmail.com

Fano resonance is a ubiquitous phenomenon encountered whenever a single resonance of a system interferes with either a non-resonant background or another broader resonance. Such behavior may be found in a variety of physics areas, spanning from acoustics and electromagnetics to nuclear physics [1, 2]. Fano resonance has been witnessed in numerous configurations in optics, including single particles [3, 4], particles dimers [5], and oligomers [6] among other examples.

Another promising platform for studies of light-matter interaction is presented by halide perovskites. These are organic-inorganic compounds of the form ABX_3, where letter A stands for organic (e.g., CH_3NH_3=MA) or inorganic (e.g., Cs) cation, B is usually lead (Pb), and X represented by I, Br or Cl. They represent a class of dielectric materials with exciton resonances at room temperature, and high quantum yield [7, 8].

The ability to couple exciton resonance with light in halide perovskites nanostructures efficiently at room temperature is enormously important for modern laser technologies, photodetectors, and solar cells. We report first observation Fano resonance in halide perovskite nanoparticles originating from coupling of exciton resonance to the Mie resonances of quasispherical nanoparticles. Fano behavior is observed in the dark field spectra from single nanoparticles. $MAPbBr_3$ nanoparticles were fabricated by laser printing method [9, 10] from thin film of this material. Size was revealed by scanning electron microscopy (SEM). The Fano resonance was observed as a scattering asymmetric dip originated from the destructive interference between the exciton resonance and the Mie modes of the particles.

Finally, we have demonstrated Mie-exciton Fano coupling in single resonant halide perovskite nanoparticles. Our finding offers additional degree of control for optical properties of the perovskite nanostructures used in modern optoelectronic devices. Therefore, we anticipate broad usage of our concept in various applications.

Список литературы

1. A. E. Miroshnichenko, S. Flach, and Y. S. Kivshar, "Fano resonances in nanoscale structures", Rev.Mod. Phys. 82, 2257 (2010);
2. M. F. Limonov, M. V. Rybin, A. N. Poddubny, and Y. S. Kivshar, "Fano resonances in photonics", Nature Photon. 11, 543 (2017;
3. M. I. Tribelsky, S. Flach, A. E. Miroshnichenko, A. V. Gorbach, and Y. S. Kivshar, "Light scattering by a finite obstacle and Fano resonances", Physical review letters 100, 043903 (2008);
4. P. Fan, Z. Yu, S. Fan, and M. L. Brongersma, "Optical Fano resonance of an individual semiconductor nanostructure", Nature materials 13, 471 (2014).;

5. J. Yan, P. Liu, Z. Lin, H. Wang, H. Chen, C. Wang, and G. Yang, "Directional Fano resonance in a silicon nanosphere dimer", Acs Nano 9, 2968 (2015);
6. M. Hentschel, M. Saliba, R. Vogelgesang, H. Giessen, A. P. Alivisatos, and N. Liu, "Transition from isolated to collective modes in plasmonic oligomers", Nano letters 10, 2721 (2010);
7. B. R. Sutherland and E. H. Sargent, "Perovskite photonic sources", Nature Photon. 10, 295 (2016);
8. C. M. Sutter-Fella, Y. Li, M. Amani, J. W. Ager III, F. M. Toma, E. Yablonovitch, I. D. Sharp, and A. Javey, "High photoluminescence quantum yield in band gap tunable bromide containing mixed halide perovskites", Nano Lett. 16, 800 (2015);
9. P. Dmitriev, S. Makarov, V. Milichko, I. Mukhin, A. Gudovskikh, A. Sitnikova, A. Samusev, A. Krasnok, and P. Belov, "Laser fabrication of crystalline silicon nanoresonators from an amorphous film for low-loss all-dielectric nanophotonics", Nanoscale 8, 5043 (2016);
10. E. Tiguntseva, G.P. Zograf, F.E. Komissarenko, D.A. Zuev, A.A. Zakhidov, S.V. Makarov, and Y.S. Kivshar, "Light-Emitting Halide Perovskite Nanoantennas" Nano Letters 18 (2), 1185-1190 (2018).

Электрооптические свойства InAs и InGaAs квантовых точек в GaAs фотопреобразователях

Салий Р. А.[1], Минтаиров М. А.[1], Минтаиров С. А.[1], Шварц М. З.[1], Калюжный Н. А.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: r.saliy@mail.ioffe.ru

Среди возобновляемых источников энергии фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе GaAs сегодня являются одним из самых эффективных решений на рынке солнечной энергетики, наряду с ФЭП на основе Si. Однако невозможность преобразовывать весь солнечный спектр ввиду единственного значения ширины запрещенной зоны материала ФЭП с одним p-n переходом приводит к таким фундаментальным потерям, как неполное поглощение фотонов и термализация носителей. На сегодняшний день одним из самых перспективных подходов к снижению фундаментальных потерь является увеличение спектральной чувствительности и КПД прибора за счет многофотонных процессов поглощения в одноперходных структурах ФЭП. Основным кандидатом на структурную реализацию такого подхода предложены массивы квантовых точек (КТ) [1, 2].

На сегодняшний день InAs/GaAs КТ является наиболее изученной системой для встраивания в матрицу одноперходного GaAs ФЭП. Такие приборы уже продемонстрировали заметный прирост фототока за счет поглощения подзонных фотонов [3, 4]. Однако разница параметров кристаллических решеток бинарных соединений InAs и GaAs не позволяет существенно увеличить область поглощения КТ путем их многократного складирования, так как приводит к ухудшению качества основного поглощающего мате-

риала и падению спектральной чувствительности в коротковолновой области. В данной работе были исследованы GaAs ФЭП со встроенными массивами InAs и $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ КТ. Путем анализа их электрооптических свойств и сравнения фотоэлектрических характеристик показано, что введение 20% Ga в состав InAs КТ позволяет существенно улучшить качество матрицы прибора даже при складировании большого количества слоев КТ.

Методом металлорганической газофазной эпитаксии было выращено две серии образцов одноперехоных GaAs ФЭП со встроенными InAs и $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ КТ, в каждой из которых структуры различались количеством слоев КТ (от 1 до 20 слоев). Согласно проведенным ранее исследованиям, в соответствии с максимальной интенсивностью фотолюминесценции InAs/GaAs и $In_{0.8}Ga_{0.2}As$/GaAs гетероструктур было выбрано оптимальное количество материала для формирования InAs и $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ КТ, которое составило 1.7 и 2 ML соответственно [4, 5]. Экспериментальные образцы ФЭП на базе выращенных структур создавались путем формирования фронтального и тыльного Ni контактов и последующего стравливания контактного слоя p+-GaAs с фотоактивной поверхности.

Были измерены спектральные характеристики внутреннего квантового выхода и показано, что встраивание 15 слоев InAs КТ в матрицу GaAs ФЭП уже приводит к заметному падению спектральной чувствительности в области поглощения GaAs, что говорит об ухудшении качества p-n перехода. При этом продемонстрировано, что складирование до 20 слоев $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ КТ, напротив, позволяет получить прирост фотогенерированного тока без потери коротковолновой чувствительности прибора. Для всех образцов ФЭП были получены зависимости напряжения холостого хода (V_{oc}) от кратности солнечного излучения (X). Была проведена аппроксимация полученных характеристик при помощи одно-экспоненциальной модели с диодным коэффициентом идеальности A=1. В результате аппроксимации были получены предэкспоненциальные множители X0 и построена экпериментальная зависимость X0 от количества слоев КТ в исследуемых ФЭП. На основе полученных данных был определен коэффициент линейного роста, который для ФЭП с $Ga_{0.8}In_{0.2}As$ КТ составил ~1.6e-15 A/cm^2 на слой КТ. Для ФЭП с InAs КТ линейный наклон предэкспоенты единичной компоненты тока был на три порядка выше и составлял ~5×10^{-12} A/cm^2 на слой КТ, что эквивалентно падению напряжения на ~0,2 В. Таким образом, полученные значения явно указывают на значительное преимущество $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ в качестве материала КТ для встраивания в GaAs ФЭП.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение 17-72-20146).

Список литературы

1. Luque A and Marti A 1997 Phys. Rev. Lett. 78 pp 5014–5017;
2. Luque A and Mellor A V 2015 Photon Absorption Models in Nanostructured Semiconductor Solar Cells and Devices (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology);
3. C. G. Bailey, D. V. Forbes, S. J. Polly, Z. S. Bittner, Y. Dai, Chelsea Mackos, R. P. Raffaelle, and S. M. Hubbard 2012 Journal on Photovoltaics 2 pp 269 – 275;
4. Kalyuzhnyy N A et al. 2016 Progress in Photovoltaics 24 9 pp 1261–1271;

5. Salii R A et al. 2017 Proc. Int. Conf. Physica.SPb/2017 (Saint-Petersburg).

Study of the formation of nanostructures during droplet epitaxy of In on the Ga-stabilized nanopatterned substrates

Балакирев С. В.[1], Еременко М. М.[2], Михайлин И. А.[2], Солодовник М. С.[1], Агеев О. А.[2]

[1]ЮФУ
[2]ЮФУ, НОЦ «Нанотехнологии»

Эл. почта: sbalakirev@sfedu.ru

The use of nanostructures opens wide prospects for the realization of nanolasers, photonic integrated circuits, quantum computers etc. However, selective positioning of nanostructures and precise control of their characteristics within a wide range should be provided to ensure the best device parameters.

In the present work, kinetic Monte Carlo model based on the analytical nucleation theory is used to describe the processes of droplet epitaxy of In on the nanopatterned GaAs substrates. We previously validated the model by the experiments in a wide range of growth temperatures. The studies demonstrated nonmonotonic dynamics of the adatom supersaturation and island critical size as well as formation of the wetting layer with thickness depending on the substrate temperature [1].

The simulation results show that almost whole deposited material is expended on the formation of nanostructures inside the holes. The mobility of indium adatoms on the Ga-stabilized surface is high, which prevents the formation of a wetting layer. On the substrates with triangular-shaped holes, formation of the wetting layer is observed on the walls which are the crystallographic faces of the {111} family. On the side walls of rectangular holes, which are faces with the (110) orientation, the wetting layer does not form. This phenomenon is explained by the greater diffusion length on the (110) surface compared with the (111) and (001) surfaces, which is confirmed by a number of experimental and theoretical studies [2-3].

The holes on the substrate are filled completely over a wide range of growth rates (v) and temperatures (T). We reveal that there are the most optimal parameters of patterning for a certain set of the growth conditions. The hole diameter (d_h) of 10 nm, height (h_h) of 8 nm and interhole distance (r_h) of 20 nm should be fulfilled to achieve localization of nanostructures in holes with complete filling and suppression of nucleation in flat regions during epitaxy at T = 150 °C, v = 0.5 ML/s and deposition thickness H = 5 ML.

The study also shows that varying the deposition thickness enables an independent control of the dimensions of nanostructures formed in the holes, while maintaining the surface density unchanged. When 6 ML of In is deposited at a growth rate v = 0.25 ML/s at T = 250°C, rectangular holes with a diameter of 14 nm and a depth of 12 nm are completely filled with the deposited material exceeding the level of the substrate, forming the body of the nanostructure. Reducing the thickness of deposition to 3 ML results in partial filling of the holes, and there-

fore, for these conditions, modification of the substrate is required. As the volume of the hole decreases (diameter 10 nm, depth 8 nm) at the same deposition thickness of 3 ML, the modified sections are completely filled by nanostructures with the deposited material.

This work was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 15-19-10006 and by Grant of the President of the Russian Federation No. MK-2629.2017.8. The results were obtained using the equipment of the Research and Education Center and Center for Collective Use "Nanotechnologies" of Southern Federal University.

Список литературы

1. Balakirev S. V., Solodovnik M. S., Ageev O. A., Hybrid Analytical–Monte Carlo Model of In/GaAs(001) Droplet Epitaxy: Theory and Experiment, Physica Status Solidi B, 1700360, 2018;
2. Lopez M., Nomura Y., Surface diffusion length of Ga adatoms in molecular-beam epitaxy on GaAs (100)–(110) facet structures, Journal of Crystal Growth, 150(1), 68, 1995;
3. Balakirev S. V., Solodovnik M. S., Mikhaylin I. A., Eremenko M. M., Ageev O. A., Monte Carlo investigation of the MBE growth of GaAs on the surfaces with different crystallographic orientations, Journal of Physics: Conference Series, 917(3), 032034, 2017.

Porous silicon and graphene-based nanostructures for novel solar energy systems

Smerdov Rostislav[1], Mustafaev A. S.[1], Spivak Yu.M.[2], Moshnikov V. A.[2]

[1]Saint Petersburg Mining University, Russia
[2]ETU, Russia

Эл. почта: rostofan@gmail.com

The process of solar energy conversion can be implemented by one of the two distinct approaches. The first one is the so-called "quantum" approach commonly realized in photovoltaic cells that allow the use of solar energy to excite electrons. The second one is the "thermal" approach, for which concentrated sunlight is used as a source of thermal energy for electricity generation using heat engine. In practice the combination of the two approaches rapidly loses effectiveness both with an excessive increase in operating temperatures resulting in the degradation of photocells and with a decrease in operating temperatures resulting in the loss of heat engine’s effectiveness.

Systems based on the phenomenon of photon-enhanced thermionic emission (PETE) allow us to overcome these drawbacks by simultaneously implementing the photovoltaic and thermionic phenomena that allow us to use quantum and thermal mechanisms at the same time in one physical process [1].

The proposed device is based on the effect of thermionic emission of photoexcited electrons from a semiconductor cathode at high temperature. The solar concentrator will operate at

temperatures higher than 200° C, which allows the use of thermal energy to realize the thermionic emission process, increasing the theoretical efficiency of the combined conversion to values of approximately 50% [1].

The possibility of synthesizing systems based on PETE with semiconductor (GaN) electrodes was demonstrated in [1], however, the number of incident photons with energies exceeding the band gap of GaN (Eg = 3.3 eV) is less than 1% of their total quantity.

That is why, the studies of porous silicon (PS) as well as PS-based composite structures for subsequent electrode synthesis are promising, since the band gap of such materials can be modified in a wide range from 1 to 3 eV due to the quantum confinement effect [2] and significant opportunities for surface functionalization [3, 4, 5].

Synthesis of anodes for plasma energetic systems based on thermionic emission process requires the creation of materials with a low electron work function (ϕ_a) from the surface. The problem of j_a reducing is traditionally solved by using alkaline and alkaline-earth metals, in particular, cesium (Cs) [6]. Anodes based on cesium-coated tungsten are traditionally used due to their high thermal stability and a relatively low achievable work function (ϕ_a = 1.7 eV). The use of a nickel anode coated with graphene layers intercalated with cesium atoms made it possible to obtain an unprecedented decrease in the work function of electrons from the surface of the material (ϕ_a < 1 eV) and, as a consequence, a threefold increase in the energy conversion efficiency (up to 25%) [6].

The implementation of alkali and alkaline earth metal coatings is not the only method of the semiconductor work function modification. In particular, we propose high electron affinity PS and PS-based nanocomposites functionalized with silver nanoparticles and C_{60}-Ag fullerenols as low work function anodes for PETE – systems. The bond of the C_{60} molecule to the Ag atom leads to an increase in the dipole moment of the anode surface as a whole. In this case, a partially filled layer of dipoles oriented with its positive charge away from the surface to the outer half-space exists. Such orientation of surface dipoles leads to a decrease in the electron work function thus allowing us to consider PS-based composite structures as a promising material for PETE-electrode synthesis.

Список литературы

1. Schwede J.W., Bargatin I., Riley D.C., Hardin B.E., Rosenthal S.J., Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems, Nature Materials, 9, 762-767, 2010;
2. Nolan M., O'Callaghan S., Fagas G., Greer J.C., Silicon nanowire band gap modification, Nano Lett., 1, 34-38, 2007;
3. Spivak Yu.M., Mjakin S.V., Moshnikov V.A., Surface Functionality Features of Porous Silicon Prepared and Treated in Different Conditions, J. of Nanomaterials, 2016, 8 p., 2016;
4. Mustafaev A., Smerdov R., Klimenkov B., Semiconductor nanostructures for plasma energetic systems, Bulletin of the American Physical Society., 12, 2017;
5. Smerdov R.S., Loboda V.V., Spivak Yu.M., Moshnikov V.A., UV-Vis band-stop filter based on plasmon resonance for fluorescent microscopic applications, SPbSPU

Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems, 3(247), 13-22, 2016;

6. Mustafaev A.S., Polishchuk V.A., Tsyganov A.B., Yarygin V.I., Petrov P.A., Effects of graphite intercalation with cesium in a thermionic converter, Russian Journal of Physical Chemistry B, 1, 118–120, 2017.

Низкотемпературные электронные свойства пленок металлоорганических перовскитов

Ершова А. М.[1], Овезов М. К.[2], Алешин А. Н.[2]

[1]СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
[2]ФТИ

Эл. почта: ershova_n96@inbox.ru

В последние годы материалы на основе металлоорганических перовскитов вызывают большой интерес из-за перспектив их использования в качестве активных слоев высокоэффективных солнечных элементов[1, 2, 3]. Основным преимуществом устройств, основанных на пленках металлорганических перовскитов, является относительная легкость их изготовления в виде тонкой пленки при достаточно низких температурах и перестраиваемые оптоэлектронные свойства. Химический состав структуры перовскита, способный комбинировать с другими органическими и неорганическими субэлементами, делает его полезным компонентом для эффективного и экономически выгодного подхода получения солнечной энергии [4].

Целью работы является получение и исследование электрических свойств металлоорганических перовскитов $CH_3NH_3PbBr_3$ и $CH_3NH_3PbI_3$.

Перовскитные материалы на основе $MAPbX_3$ ($MA = CH_3NH_3^+$, X = Cl, Br, I) имеют температурно-зависимую кристаллическую структуру, в которой с понижением температуры происходит ряд структурных фазовых переходов: от кубической → к тетрагональной→ и к орторомбической решетке [5].

В нашей работе были получены температурные зависимости удельного сопротивления, из которых была найдена энергия активации носителей заряда и определена температура фазового перехода из тетрагональной в орторомбическую структуру для двух материалов. Было установлено, что интервал температур такого перехода варьируется от 140 — 200К. Для образца $CH_3NH_3PbBr_3$ составила T = 142К, а для $CH_3NH_3PbI_3$ — T = 200К. Кроме того, энергия активации в двух структурах отличается примерно в 2 раза. Для $CH_3NH_3PbBr_3$ энергия активации в тетрагональной структуре составила ΔE_a~121 эВ, а в орторомбической — ΔE_a~54 эВ, и соответственно, для $CH_3NH_3PbI_3$ составила ΔE_a~430 эВ в тетрагональной и ΔE_a~189 эВ в орторомбической. Сравнивая два образца, можно сказать, что энергия активации материала $CH_3NH_3PbBr_3$ меньше, чем у $CH_3NH_3PbI_3$. Из этого следует, что концентрация электрически активных примесей у него выше, следовательно, транспорт носителей заряда более ярко выражен, что воз-

можно связано с меньшей способностью к окислению пленок $CH_3NH_3PbBr_3$ по сравнению с $CH_3NH_3PbI_3$.

Также были исследованы вольтамперные характеристики, снятые в интервале температур 180 — 280К для двух образцов соответственно, из которых можно сделать вывод, что материал $CH_3NH_3PbBr_3$ имеет большую проводимость по сравнению с $CH_3NH_3PbI_3$.

В результате работы были исследованы образцы металлоорганических перовскитов и их электрические свойства. Было установлено, что изменение температуры в интервале 280 — 100 К приводит к изменению решетки из тетрагональной в орторомбическую структуру, энергия активации в которых отличаются примерно в 2 раза. Кроме того, изменение температуры влияет на электрическую проводимость материала.

Список литературы

1. National Renewable Energy Laboratory, Best Research Cell Efficiencies, www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg; accessed: June 2016;
2. N.J. Jeon, J.H. Noh, W.S. Yang, Y.C. Kim, S. Ryu, J. Seo,S.I. Seok. Nature 517, 476 (2015);
3. А.Н. Алешин, И.П. Щербаков, И.Н. Трапезникова, В.Н. Петров. Физика твердого тела, 2017, том 59, вып. 12;
4. Gailan A. Al-Dainy,Shawn E. Bourdo,Viney Saini, Brian C. Berry,Alexandru S. Biris. Energy Technol. 2017, 5, 373 – 401;
5. HyunSukJung, Nam-Gyu Park. Small 2015, 11, No. 1, 10–25.

Формирование Ленгмюровских монослоев с включениями наночастиц никеля

Шинкаренко О. А.[1], Чумаков А. С.[1], Аргунов Е. В.[1], Аль-Алвани А. Ж. К.[1], Цветкова О. Ю.[1], Захаревич А. М.[1], Глуховской Е. Г.[1,]

[1]СГУ

Эл. почта: oksana.sh63@mail.ru

Получение и исследование различных наноразмерных объектов (наночастиц, нанопроволок, нанокапсул и др.) в последние время является одним из основных направлений нанотехнологий. Это связано с уникальными свойствами, а также их применением в различных областях науки, в частности, для получения эффективных катализаторов, для создания элементов микроэлектронных и оптических устройств, биосенсеров и др. [1, 2]. Особый интерес для устройств наноэлектроники представляют наночастицы различных металлов. Одним из примеров их применения является получение активных слоев на их основе, для создания суперконденсаторов.

Таким образом, актуальной задачей является получение металлических наночастиц и создание пленок на их основе. В качестве материала выбран никель, который чаще

всего используется как катализатор в реакциях конденсации, а также он обладает хорошими электрическими свойствами.

В наших экспериментах синтез наночастиц никеля проводился путем химического восстановления никеля энергичным восстановителем гидразин–гидратом из его солей в щелочной среде (pH = 12), в качестве стабилизатора, использовали катионогенное поверхностно-активное вещество цетилтриметиламмония бромид (ЦТАБ). Результаты синтеза были подтверждены спектром поглощения (263 нм), соответствующим литературным данным для наночастиц никеля [3], а также элементным анализом на сканирующем электронном микроскопе. В ходе синтеза были получены наночастицы никеля с размером до 200 нм.

Для получения слоев с включениями наночастиц никеля использовался метод Ленгмюра-Блоджетт. Для этого на поверхность воды закапывали 100 мкл раствора с наночастицами и слой сжимали двумя подвижными барьерами со скоростью 10 мм/мин. Полученные данные характеризовали изотермами сжатия, где наблюдалась плотная упаковка молекул. В результате исследований определены оптимальные условия формирования и переноса монослоев с включениями наночастиц никеля на твердые подложки.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов DAAD 4.9977.2017/5.2 и РФФИ 17-32-50137 мол_нр.

Список литературы

1. Henglein A, Formation and absorption spectrum of copper nanoparticles from the radiolytic reduction of Cu(CN)2, J. Phys. Chem., 97, 21, 5457-5471, 1993;
2. Ai L., Guojia F. et al, Influence of substrate temperature on electrical and optical properties of p-type semitransparent conductive nickel oxide thin films deposited by radio frequency sputtering, Appl Surf Sci., 254, 2401–2405, 2008;
3. Ершов Б.Г., Водные растворы коллоидного никеля: радиационно-химическое получение, спектры поглощения и свойства, Изв. АН. Сер. хим., 10, 1733-1739, 2000.

Фотоиндуцированный перенос электрона от квантовой точки к наночастице диоксида титана в многослойных гибридных структурах

Колесова Е. П.[1], Маслов В. Г.[1], Cleary Olan[2], Гунько Ю. К.[1], Орлова А. О.[1]

[1]ИТМО
[2]Trinity College, Ireland

Эл. почта: ekaterina_petrovna@mail.ru

Формирование гибридных структур является трендом современных нанотехнологий и позволяет объединять уникальные свойства компонент, входящих в их состав [1]. Полупроводниковые квантовые точки CdSe/ZnS (КТ) широко используются в гибридных

структурах в качестве донора энергии или заряда [2]. В качестве второго компонента гибридных структур могут выступать наночастицы диоксида титана (НЧ TiO_2), которые способны генерировать активные формы кислорода (АФК) [3]. Взаимное расположение уровней энергии в КТ и НЧ TiO_2 делает возможным фотоиндуцированный перенос электрона от КТ к TiO_2 [4]. Реализация данного процесса в структурах TiO_2/КТ позволяет получить систему, проявляющую антибактериальную активность под действием света видимого диапазона, который, в отличие от УФ излучения, безопасен для живых организмов.

В структурах TiO_2/КТ перенос электрона конкурирует с излучательной релаксацией фотовозбуждения в КТ. Поэтому эффективный перенос электрона от КТ к НЧ TiO_2 должен сопровождаться тушением люминесценции КТ. В предположении, что перенос электрона является доминирующим механизмом тушения люминесценции КТ в структурах TiO_2/КТ, анализ люминесцентных свойств КТ позволяет оценить скорость переноса электрона из экспериментальных данных и оптимизировать архитектуру гибридных структур. Однако в большинстве работ игнорируется наличие мультиэкспоненциального распада экситонной люминесценции в КТ. А в немногочисленных работах, в которых мультиэкспоненциальность затухания люминесценции учитывается, принято рассматривать перенос электрона только от фракции КТ, характеризующейся наиболее длительным временем затухания люминесценции [5]. В связи с этим, представляется необходимым выявить закономерности переноса электрона в структурах TiO_2/КТ с учетом мультиэкспоненциальности затухания люминесценции КТ.

В работе использовались КТ CdSe/ZnS (5.5 нм) и сферические НЧ TiO_2 (2 нм). Многослойные структуры TiO_2/КТ формировались модифицированным методом Ленгмюра-Блоджетт [6].

Функциональность структур TiO_2/КТ была протестирована с помощью химического сенсора RNO на АФК [7]. Анализ полученных данных показал, что НЧ TiO_2 эффективно генерируют АФК под действием УФ излучения (365 нм) и не проявляют фотокаталитической активности под действием света видимого диапазона (530 нм). Образцы, содержащие только сухие слои КТ, не проявляли фотокаталитической активности, независимо от длины волны падающего излучения. В тоже время было установлено, что структуры TiO_2/КТ генерируют АФК под действием света видимого диапазона. Это напрямую свидетельствует о фотоиндуцированном переносе электрона от КТ к НЧ TiO_2.

Анализ люминесцентных свойств структур TiO_2/КТ показал, что распад люминесценции КТ аппроксимировался биэкспоненциальной зависимостью с характерными временами 12 и 2.5 нс. Было установлено, что степень тушения люминесценции фракций КТ с различными характерными временами практически одинакова (~ 30%). Оценки скорости переноса электрона в структурах TiO_2/КТ показали, что для фракции КТ, характеризующейся временем затухания люминесценции 2.5 нс, скорость переноса электрона к TiO_2 в 4 раза выше, чем для фракции со временем 12 нс. Данное различие может быть интерпретировано с учетом модели блинкинга КТ. В данной теории мультиэкспоненциальность затухания люминесценции КТ при комнатной температуре объясняется случайным переключением КТ между нейтральным, положительно и отрицательно за-

ряженным состояниями [8]. Согласно теории блинкинга к фракции КТ с характерным временем затухания 2.5 нс могут быть отнесены КТ с дополнительным электроном, а к фракции со временем 12 нс — КТ в нейтральном состоянии. Поэтому столь эффективное увеличение скорости переноса электрона для КТ с характерным временем затухания 2.5 нс представляется логичным и интуитивно понятным, т.к. наличие дополнительного электрона в КТ может заметно увеличивать вероятность его передачи второму компоненту структуры. В продолжение работы планируется контролируемо менять заряд на КТ и исследовать перенос заряда в структурах.

Список литературы

1. Medintz I.L., Uyeda H.T., Goldman E.R., Mattoussi H., Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing, Nature materials, 4 (6), 435, 2005;
2. 2. Costi Ronny, Aaron E. Saunders, Uri Banin., Colloidal hybrid nanostructures: a new type of functional materials, Angewandte Chemie International Edition, 49 (29), 4878-4897, 2010;
3. 3. Nosaka Yoshio, Atsuko Y. Nosaka., Generation and Detection of Reactive Oxygen Species in Photocatalysis, Chemical reviews, 117 (17), 11302-11336, 2017;
4. Talgorn E., Abellon R.D., Kooyman P.J., Piris J., Savenije T.J., Goossens A., Siebbeles L.D., Supercrystals of CdSe quantum dots with high charge mobility and efficient electron transfer to TiO2, Acs Nano, 4 (3), 1723-1731, 2010;
5. Hamada M., Nakanishi S., Itoh T., Ishikawa M., Biju V., Blinking suppression in CdSe/ZnS single quantum dots by TiO2 nanoparticles, ACS nano, 4(8), 4445-4454, 2010;
6. Gromova Y.A., Reznik I.A., Vovk I.A., Rackauskas S., Alaferdov A.V., Orlova A. O., Fedorov A.V., Photoinduced conductivity enhancement in quantum dot/multilayer graphene nanostructures, MRS Online Proceedings Library Archive, 1787, 15-19, 2015;
7. Burns J.M., Cooper W.J., Ferry J.L., King D.W., DiMento B.P., McNeill K., Rose A.L., Methods for reactive oxygen species (ROS) detection in aqueous environments, Aquatic Sciences, 74(4), 683-734, 2012;
8. Galland C., Ghosh Y., Steinbrück A., Sykora M., Hollingsworth J.A., Klimov V.I., Htoon H., Two types of luminescence blinking revealed by spectroelectrochemistry of single quantum dots, Nature, 479(7372), 203, 2011.

Газочувствительные тонкопленочные оловосодержащие материалы

Зубенко Н. А.[1], Семенистая Т. В.[1]

[1]ЮФУ

Эл. почта: niw1994@mail.ru

К нагрузке на окружающую природную привело интенсивное развитие промышленности и технологий. Вследствие этого, возникает необходимость в контроле за состоянием окружающей природной среды. Известно, что поликристаллические пленки олова

широко используются для создания сенсоров как газов окислителей, так и восстановителей: CH_4, C_2H_5OH, H_2, NH_3, H_2S, CO, O_2, C_3H_6O [1-3].

Целью данной работы является получить газочувствительные тонкие пленки оловосодержащего полиакрилонитрила. Особенностью данного материала является возможность получения сенсорных элементов, функционирующих при комнатной температуре, по технологии, не требующей высокотехнологичного оборудования.

Пленки оловосодержащего полиакрилонитрила получали по известной технологии [4]. С целью отработки технологии получения оловосодержащего полиакрилонитрила пленок и отбора пленок с наилучшими газочувствительными характеристика были синтезированы серии образцов пленок с разным содержанием олова в пленкообразующих растворах при варьировании температурно-временных режимов их получения на первом и втором этапе ИК-отжига. Были проведены предварительные опыты по определению их чазочувствительных характеристик и было установлено, что полученные образцы имеют отклик на такие газы как: CH_4, CO, NO_2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Южного федерального университета, грант № ВнГр-07/2017-21. Результаты получены с использованием оборудования НОЦ «Микросистемная техника и мультисенсорные мониторинговые системы».

Список литературы

1. Nasresfahania Sh., Sheikhia M.H., Tohidib M., Zarifkara A., Methane gas sensing properties of Pd-doped SnO_2/reduced graphene oxide synthesized by a facile hydrothermal route, Materials Research Bulletin, 89, 161-169, 2017;
2. Horastani Z.K., Sayedi S.M., Sheikhib M.H., Rahimi E., Effect of silver additive on electrical conductivity and methane sensitivity of SnO_2, Materials Science in Semiconductor Processing, 35, 38-44, 2015;
3. Haridas D., Gupta V., Enhanced response characteristics of SnO_2 thin film based sensors loaded with Pd clusters for methane detection, Sensors and Actuators B: Chemical, 166-167, 156-164, 2012;
4. Semenistaya T.V., Polyacrylonitrile-based materials: Properties, Methods and Applications, Springer Proceedings in Physics,175, 61-77, 2016;

Nonlocal excitonic effects in Mie-resonant halide perovskite nanoparticles

Berestennikov A. S.[1], Iorsh I. V.[1], Makarov S. V.[1]

[1]ITMO University

Эл. почта: berestennikov.alex@gmail.com

Metal halide perovskite materials have attracted great scientific and technological interest in recent years, due to their excellent properties including bandgap tunability, long charge diffusion length, outstanding optoelectronic merits combined with low cost and solution processability, which greatly contribute to their high potential for optoelectronic devices [1]. The materials based on perovskite quantum dots (QDs) have a favourable combination of quantum-

size effects, improving their optical properties in comparison with bulk analogues, Mie resonances and the ability to disperse in a variety of solvents and matrices, which allows them to be introduced into various devices. In order to create effective light-emitting devices, it is necessary to be able to change the optical properties of nanoparticles, such as the wavelength of the luminescence, the absorption/scattering cross-sections and the radiation direction [2]. In some works [3, 4] it was found that in nanocrystals of perovskites with a size of less than 80 nm, the photoluminescence peak is blue-shifted. The origin of this phenomenon was not explained, and the curve of the dependence of the peak shift on the particle sizes was interpolated by the empirical formula. In this work we proposed a possible mechanism responsible for the shift of the photoluminescence peak in perovskite nanoparticles. It may be related with the effect of nonlocality of excitons in such nanoparticles.

The Mie theory explains the optical properties of spheres of arbitrary diameters, consisting of an isotropic material, which is characterized by a local dielectric constant, which depends only on the frequency. However, metallic and dielectric spheres can have interesting optical effects, which cannot be explained by the classical local model. In this case, the observed effects can be explained by using a modified Mie theory, in which spatial dispersion is included by adding a nonlocal term to the equation of the classical local dielectric function [5]:

$$\varepsilon(\omega,\mathbf{k}) = \varepsilon_0 + \frac{\omega_p^2}{\omega_T^2 + Dk^2 - \omega^2 - i\gamma\omega},$$

where ε_0 is background dielectric constant, ωp is the dipole oscillator strength, Dk^2 – is the spatial dispersion term, γ – is the damping term and ω_T is the excitonic transition frequency.

In order to explain the blue-shift of the photoluminescence we applied the generalized Mie theory to the calculation of the optical properties of the $CH_3NH_3PbI_3$ (or MAPI) nanoparticles. The local and nonlocal absorption cross-sections of the MAPI nanoparticles with different radii were calculated. In the classical (local) case, the shift of the absorption peak is not observed. For nonlocal case with decreasing of the nanoparticle radius, the main peak shifts to lower wavelengths. This shift is due to the fact that the exciton is not stationary, but has kinetic energy, so it emits and absorbs at a higher frequency.

We proposed that a mechanism with which the blueshift of the luminescence peak in perovskite nanoparticles is associated with nonlocality of material around exciton. We performed numerical calculations of the absorption and scattering cross-sections of incident light in such nanoparticles in the local and nonlocal cases. Using this results, we plotted the spectral and radii dependences of the in both cases. Our investigations showed that the possible mechanism of blue shift of the photoluminescence peak in perovskite nanoparticles is associated with the nonlocality of excitons.

Список литературы

1. He Huang, L. Polavarapu, J. A. Sichert, A. S. Susha, A. S. Urban & A. L Rogach, NPG Asia Materials volume 8, e328 (2016);
2. M. V. Kovalenko, L. Protesescu, M. I. Bodnarchuk, Science 358 6364 745-750 (2017);
3. D. Di, K. P. Musselman et al., J. Phys. Chem. Lett., 6 (3), pp 446–450 (2015);

4. V. D'Innocenzo, A. R. S. Kandada, M. De Bastiani, M. Gandini and A. Petrozza, J. Am. Chem. Soc., 136 (51), pp 17730–17733 2014;
5. R. Ruppin, J. Opt. Soc. Am., 71 6 755-758.(1981).

Исследование совершенства эпитаксиальных тонких пленок ферритов-гранатов

Максимов Г. С.[1], Наухацкий И. А[1], Максимова Е. М.[1]

[1]КФУ им. В. И. Вернадского

Эл. почта: maksimovaem@cfuv.ru

Эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов находят широкое практическое применение. Необходимым условием надежной работы эпитаксиальных структур является их структурное совершенство, заключающееся, в том числе, и в близких значениях параметров элементарных ячеек пленки и подложки (параметр рассогласования).

В работе были исследованы магнитные Bi-содержащие монокристаллические пленки феррит-гранатов (Bi-МПФГ), выращенные методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава в Научно-исследовательском центре функциональных материалов и нанотехнологий Физико-технического института КФУ им. В.И. Вернадского. В качестве подложки использовался кубический немагнитный монокристаллический галлий-гадолиниевый гранат (ГГГ) $Gd_3Ga_5O_{12}$ плоскостной кристаллографической ориентации (111). Структурные исследования проводились на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.

Также в работе была исследована морфология поверхности пленок с помощью атомно-силового микроскопа NANOEDUCATOR II. Показано, что поверхности пленок одного и того же химическоо состава, но с разными параметрами рассогласования, имеют значительные различия в своем островковом строении.

Методом анализа уширения дифракционных профилей были исследованы параметры тонкой структуры пленок: размеры областей когерентного рассеяния и микродеформаций. Для чего была проведена съемка двух дифракционных пиков пленок с индексами (444) и (888). Установлено, что уширение пиков носит преимущественно размерный харакер.

Список литературы

1. Шапошников А.Н., Бержанский в.Н. и др. // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Физика», Симферополь, 2009. № 4. С.35;

Влияние на электрический транспорт в графене его заряженного интерфейса с водными растворами

Бутко А. В.[1], Бутко В. Ю.[1,2], Лебедев С. П.[3], Смирнов А. Н. [1], Давыдов В. Ю.[1], Лебедев А. А.[1], Кумзеров Ю. А.[1]

[1]ФТИ
[2]СПбАУ РАН
[3]ФТИ

Эл. почта: vladimirybutko@gmail.com

Графен рассматривается, как один из наиболее перспективных материалов для создания электронных устройств, включая химические и биологические сенсоры. Поэтому изучение электрических свойств графена в различных интерфейсных условиях является важным для практических применений [1-5]. В том числе, большой интерес вызывали работы, посвященные созданию pH сенсоров водных растворов кислот и щелочей с использованием графена в транзисторной геометрии [5]. Определение pH раствора в этих работах достигалось путем определения положения точки Дирака из измерений характеристик полевых транзисторов на основе графена. Нами проводились исследования графена в схожей геометрии. Эпитаксиальный графен для наших исследований был выращен путем термического разложения карбида кремния в аргоне при давлениях ~ 700 Torr при температуре 1850±20 ºC. Качество и количество моноатомных слоев в образцах контролировались методами Рамановской спектроскопии. Было установлено, что ~85% поверхности образца представляют собой высококачественный монослойный графен с концентрацией точечных дефектов меньше или порядка 5 10^{10} cm^{-2} [1]. При проведении транзисторых исследований графена основное внимание было уделено исследованию временных зависимостей транзисторных характеристик и эффекта памяти состояния, обнаруженного нами в работе [1]. При проведении измерений сопротивления полевых транзисторов на основе графена, находящегося в интерфейсном контакте с водой и водными растворами KOH, наблюдается гистерезис в зависимости от направления изменения напряжения затвора. В докладе, кроме того, планируется рассмотреть обнаруженные транспортные квазистатические эффекты памяти состояния и влияние различных интерфейсных условий на электрические характеристики графена.

Список литературы

1. Butko A.V., Butko V.Y., Lebedev S.P., Lebedev A.A., Davydov V.Y., Smirmov A.N., Eliseyev I.A., Dunaevskiy M.S., Kumzerov Y.A., State memory in solution gated epitaxial graphene, Applied Surface Science, accepted, (2018), https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.007;
2. Babichev A.V., Rykov S.A., Tchernycheva M., Smirnov A.N., Davydov V.Y., Kumzerov Y.A., Butko V.Y., Influence of Substrate Microstructure on the Transport Properties of CVD-Graphene, ACS Applied materials & Interfaces 8, 240, (2016);
3. Butko A.V., Butko V.Y., Electrical transport in graphene with different interface conditions, Physics of the solid state, 57, 1048, (2015);
4. Wang H., Wu Y. H., Cong C. X., Shang J. Z., Yu T., Hysteresis of Electronic Transport in Graphene Transistors, ACS Nano 4, 7221-7228, (2010);
5. Ang, P. K.; Chen, W.; Wee, A. T.; Loh, K. P. Solution-Gated Epitaxial Graphene as pH Sensor, J. AM. CHEM. SOC.130 (44), 14392–14393, (2008).

Особенности контроля состояния текущей среды рефрактометром

Гребеникова Н. М.[1], Давыдов В. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: nadyagrebenikova@mail.ru

В настоящее время одной из актуальных задач прикладной физики является разработка новых и модернизация используемых приборов для контроля состояния потока жидких сред [1, 2]. Наиболее широкое применение для решения различных задач находят приборы, в которых проводимые ими измерения не вносят существенных изменений в гидравлическое сопротивление текущего потока и не искажают его структуру [2-6]. К таким измерителям относятся ультразвуковые, ядерно – магнитные и оптические.

Наиболее сложным является исследование потоков агрессивных и опасных сред (например, бензол, гептан, концентрированная серная кислота и т.д.), а также в случаях, когда требуется соблюдение условий стерильности (например, биологические растворы, медицинские суспензии, часть продукции пищевой продукции и т.д.) [2, 3, 5, 6]. Измерения в большинстве рассмотренных потоков жидких сред необходимо проводить методами, в которых отсутствует непосредственный контакт измерительных элементов прибора с исследуемой средой. Иногда возможен незначительный контакт измерительных элементов с потоком исследуемой среды (например, оптические материалы и т.д.) [3-6].

Данная задача может быть решена используя только два типа приборов: оптические и ядерно-магнитные [2-6]. В работах [3-6] рассмотрено одно из решений данной задачи – использование рефрактометра для контроля состояния потока текущей среды. Полученные результаты показали, что в случае исследования с помощью рефрактометра жидких сред, в которых содержатся крупные нерастворимые соединения (например, сок с мякотью, медицинские суспензии, биологические растворы и т.д.), наиболее целесообразно контроль их состояния в текущем потоке осуществлять по регистрации положения границы свет-тень на фотодиодной линейке [5, 6]. Измерять показатель преломления n_m данной среды нецелесообразно.

Проведенные нами исследования текущей среды показали, что существует ряд серьёзных ограничений при проведении измерений, связанных с виньетированием лазерного пучка и снижению степени контраста R_c границы свет-тень.

Особенно существенное влияние на величину R_c оказывает температура текущей среды, которую в ряде случаев при непрерывном производственном технологическом процессе необходимо изменять на 20 — 30 ^{0}C в сторону увеличения и на 10 – 15 ^{0}C –

уменьшения. Учитывать большую поправку в смещении границы свет-тень по измеренному значению Т специализированным датчиком с помощью градуировочных таблиц при контроле состояния текущей среды в случае попадания в неё примесей достаточно сложно. Поэтому нами была предложена методика подстройки оптической схемы рефрактометра смещения границы свет-тень от появления примесей в среде или незначительных случайных колебаний Т (климатические факторы и т.д.) для обеспечения значения R_c не ниже 0.75.

Коэффициент отражения лазерного излучения от границы призма-среда до значения критического угла α_c изменяется монотонно (формула Френеля). В небольшой области углов падения перед достижением значения α_c коэффициент отражения резко возрастает (с крутизной на несколько порядков выше, чем до этого). Для лучей лазерного излучения падающих на границу раздела призма-среда под углами больше α_c коэффициент отражения имеет значение 1. Если центр диаграммы направленности лазерного пучка падает на границу раздела двух сред под углами $\alpha \geq \alpha_c$, то значение R_c максимально, так как на фотодиодной линейке регистрируется пик интенсивности лазерного излучения. Для реализации данной методики в случае использования рефрактометра для контроля сред, в которых Т изменяется в отмеченных пределах, из его стандартной конструкции необходимо исключить оптическую систему расширяющую лазерный пучок и использовать лазеры широкой диаграммой направленности. Это позволит более эффективно контролировать угол ввода излучения в призму для подстройки положения максимума пучка под α_c, изменять его в более широких пределах по сравнению со случаем наличия расширяющей оптической системы.

Проведенные эксперименты показали целесообразность использования данной методики.

Список литературы

1. Popovac M., Hanjalic K., Compound wall treatment for RANS computation of complex turbulent flows and heat transfer, Flow, Turbulence and Combustion., V. 78. No 2, P. 177 – 184, 2007;
2. Давыдов В.В., Дудкин В.И., Вологдин В.А Карсеев А.Ю. Особенности применения метода ядерно – магнитной спектроскопии для исследования потоков жидких сред., ЖПС. Т. 82. № 6, С. 898 – 902, 2015;
3. Шур В.Л., Найденов А.С., Лукин А.Я., Лейбенгард Г.И. Жидкостный автоколлимационный рефрактометр., Измерительная техника., № 8, С. 50-53, 2006;
4. Белов Н.П., Лапшов С.Н., Майоров Е.Е., Шерстобитова А.С., Яськов А.Д. Оптические свойства растворов черных щелоков и рефрактометрические средства контроля концентраций сухого остатка в сульфатном производстве целлюлозы., ЖПС, Т. 79. № 3, С. 514-516, 2012;
5. Grebenikova N.M., Davydov V.V., Rud’ V.Yu, Non-contact quality control of liquid agricultural products in the agro-industrial complex. The book of proceeding of International Youth Scientific environmental forum «Ecobaltica — 2017». 24-27, Republic of Belarus, Grodno, P. 193-200, August 2017;
6. Grebenikova N.M., Davydov V.V., Rud’ V.Yu, Non-contact quality control of liquid agricultural products in the agro-industrial complex. The book of proceeding of International Youth Scientific environmental forum «Ecobaltica — 2017». 24-27,

Republic of Belarus, Grodno, P. 193-200, August 2017 Гребеникова Н.М., Давыдов В.В., Универсальный оптический метод контроля состояния текущей среды, Труды международной молодёжной конференции ФизикА.СПб 2017, С. 182 – 183, 24-26 октября 2017.

Модифицированный метод лазерной триангуляции

Адамов А. А.[1], Баранов М. С.[1], Храмов В. Н.[1], Абдрахманов В. Л.[2], Голубев А. В.[2], Чечеткин И. А.[2]

[1]ВолГУ
[2]ВолГТУ

Эл. почта: anto-kha1@mail.ru

Измерение толщины прозрачных для излучения видимого диапазона тонких слоев биологической ткани в интервале [0,01;1] мм, в частности, роговичного слоя глаза, является актуальной и полностью нерешенной задачей. Основная сложность заключается в контроле толщины остаточных роговичных слоев во время офтальмологических операций по рефракционной коррекции зрения на передних тканях глаза. Метод измерения толщины из-за специфики поставленной задачи (in vivo – на живом организме: роговице) должен удовлетворять ряду критериев: осуществляться бесконтактно с исследуемыми тканями (оптическими методами), в режиме реального времени (должно выполняться определенное соотношение скорости обработки данных к объему получаемой информации), должна учитываться безопасность применения (минимальный риск осложнений после использования).

В данной работе рассматриваются различные модификации и применение метода лазерной триангуляции к измерению толщин тонких прозрачных слоев. Проводится сравнительный анализ различных вариаций данного метода по выявлению наиболее оптимального. Приводится оценка предела наименьшей толщины слоя, которую можно измерить предложенным методом и результаты проведения экспериментов. Кроме того, предлагается алгоритм по компьютерной обработке получаемых изображений, позволяющий увеличить точность работы данного метода.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта УМНИК 17-12 (б), Волгоградская область — 2017.

Список литературы

1. Балашевич Л.И., Измайлов А.С., Качанов А.Б., Полупроводниковые лазеры в офтальмологии // глава 16. в книге под ред. А.В. Большунова Вопросы лазерной офтальмологии, Москва, С. 202-219, 2013;
2. Рапуано Кр. Дж., Ви-Джин Хенг, Роговица /; пер. с англ. Ел. А. Каспаровой, Евг. А. Каспаровой; под ред. А. А. Каспарова, ГЭОТАР-Медиа, 320 с., 2010;

3. Адамов А.А., Храмов В.Н., Оценка возможности применения метода лазерной триангуляции к измерениям толщин тонких пленок, Математическая физика и компьютерное моделирование, Т.20, № 4, С. 83-94, 2017;
4. Адамов А.А., Применение метода лазерной триангуляции для измерения толщин тонких биологических тканей, Материалы Научной сессии, г. Волгоград, 24–28 апр. Изд-во ВолГУ, С. 454-459, 2017;
5. V. N. Khramov, A. A. Adamov, "Modification of the laser triangulation method for measuring the thickness of optical layers", Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV, 1071703 (26 April 2018); doi: 10.1117/12.2314820; https://doi.org/10.1117/12.2314820;
6. A. A. Adamov, M. S. Baranov, V. N. Khramov, "Influence of temperature on the spectral characteristics of semiconductor lasers in the visible range", Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV, 1071709 (26 April 2018); doi: 10.1117/12.2314918; https://doi.org/10.1117/12.2314918;
7. Иванова Т.В., Введение в прикладную и компьютерную оптику. Конспект лекций, СПб ГИТМО (ТУ), 92 с., 2002;
8. Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н., Абдрахманов В.Л., Голубев А.В., Чеченкин И.А., Повышение разрешения световых меток при измерении толщины роговичного слоя глаза в методе лазерной триангуляции, VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник трудов, М.: НИЯУ МИФИ, С 542-543, 2018;
9. Адамов А.А., Голубев А.В., Абдрахманов В.Л., Чеченкин И.А., Программа для ЭВМ Программное средство обработки изображений экспериментальных данных для оценки расстояния между световыми метками, № регистрации (свидетельства) 2017664237, Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент), М.: ФИПС, 2017. – №12 – 2017, 21.11.2017 – 20.12.2017;
10. Калашников Е.В., Миловидов В.С., Чарухчев А.В., Дистанционные измерения параметров Объекта по его изображениям на дисплее, VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник трудов. М.: НИЯУ МИФИ, С 556-557, 2018;
11. Медведев А.В., Гринкевич А.В., Князева С.Н., Современные подходы к созданию пассивных дальномеров, Фотоника №8/68/2017, С. 30-37, 2017.

Исследование статистического уширения в твёрдых растворах InGaN

Артеев Д. С.[1], Сахаров А. В.[1], Заварин Е. Е.[1], Лундин В. В.[1], Смирнов А. Н.[1], Давыдов В. Ю.[1], Яговкина М. А.[1], Усов С. О.[2], Цацульников А. Ф.[2]

[1]ФТИ
[2]НТЦ Микроэлектроники РАН

Эл. почта: dima0724@gmail.com

Твёрдый раствор $In_xGa_{1-x}N$ успешно используется в качестве активной области светоизлучающих приборов на основе системы материалов III-N. Большой интерес представляет исследование собственно InGaN как материала с большой разницей в ширине запрещённой зоны бинарных соединений, входящий в его состав (E_g^{InN}~0.7 эВ, E_g^{GaN}~3.4 эВ). Использование InGaN теоретически позволяет создавать светоизлучащие оптоэлектронные приборы с длинами волн, перекрывающими весь видимый диапазон. Однако, большое рассогласование постоянных решётки и низкая растворимость InN в GaN приводят к сильным механическим напряжениям и флуктуациям состава в твёрдом растворе, которые существенно влияют на его структурные и оптические свойства [1].

В данной работе были исследованы объёмные слои $In_xGa_{1-x}N$ с кристаллической структурой вюрцита во всем диапазоне составов, выращенные методами газофазной эпитаксии из металлорганических соединений и молекулярно-пучковой эпитаксии на сапфировых подложках. Исследования проводились методами спектроскопии фотолюминесценции и оптического пропускания, рамановской спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Экспериментально определены величины эффективной ширины запрещённой зоны, а также зависимость значения характерной энергии Урбаха и полной ширины на уровне половины амплитуды спектров фотолюминесценции и рамановского рассеяния от состава твёрдого раствора. Проведён численный расчёт величины уширения, вызванного статистически неупорядоченным распределением атомов в твёрдом растворе и сопоставление с экспериментальными данными.

Полученные экспериментальные значения ширины спектров фотолюминесценции качественно следуют расчётной зависимости, однако сильно превышают количественно, что свидетельствует о том, что распределение индия не является статистически случайным [2] или имеются другие механизмы уширения.

Список литературы

1. Martin R.W., Middleton P.G., O'Donnell K.P., and Van der Strich W., Exciton localization and the Stokes' shift in InGaN epilayers, Appl. Phys. Lett.74, 263 (1999);
2. Kachkanov V., O'Donnell K.P., Martin R.W., Mosselmans J.F.W, and Pereira S., Local structure of luminescent InGaN alloys, Appl. Phys. Lett.89, 101908 (2006).

Исследование динамики решетки смешанных кристаллов $HoAl_{3-x}Ga_x(BO_3)_4$ (x = 0.5, 1, 3)

Еремеев Ю. А.[1], Просников М. А.[1], Гудим И. А.[2], Давыдов В. Ю.[1], Смирнов А. Н.[1], Писарев Р. В.[1]

[1]ФТИ
[2]ИФ СО РАН

Эл. почта: iuriyeremeev@mail.ru

Тригональные кристаллы состава $HoAl_{3-x}Ga_x(BO_3)_4$ (x = 0.5, 1, 3) принадлежат к пространственной группе *R32* (No. 155) с параметрами решетки: *a*=9.290 Å, *c*=7.231 Å (при x=0) [1]. Кристаллическая структура состоит из октаэдров $[(Ga/Al)O_6]$, формирующих геликоидальные цепи вдоль оси *c*, а также деформированных тригональных призм $[HoO_6]$, соединённых через треугольники $[BO_3]$. Ионы Ga замещают Al в позициях 9*d*, вызывая смещение фононных мод. В алюминиевых и смешанных алюмо-галлиевых боратах отсутствует центр инверсии, в связи с чем они проявляют оптическую активность, а также мультиферройность и гигантский магнитоэлектрический эффект [2]. В последние годы большое внимание уделяется кристаллам, обладающим подобными свойствами, в частности, редкоземельным ферроборатам $RFe_3(BO_3)_4$.

Данный доклад посвящен экспериментальным исследованиям комбинационного рассеяния на монокристаллах $HoAl_{3-x}Ga_x(BO_3)_4$ в диапазоне 50-2000 $см^{-1}$. Поляризационные спектры были измерены с использованием спектрометра T64000 (Horiba Jobin-Yvon). Также были проведены поляриметрические исследования с помощью разработанного и изготовленного нами оптического столика.

Спектры комбинационного рассеяния смешанных кристаллов $HoAl_{3-x}Ga_x(BO_3)_4$ (x = 0.5, 1, 3) при комнатной температуре характеризуются широкими перекрывающимися фононными полосами, что обусловлено малым временем жизни фононов. Это свойство затрудняет определение энергии и симметрии фононов, однако использование поляриметрии позволило идентифицировать теоретически предсказанные моды. На спектрах рассеяния обнаружено монотонное ужесточение фононов на 15-30 $см^{-1}$ с увеличением концентрации атомов Al, при этом часть мод не проявляет подобного эффекта. Более детальное изучение кристаллов различного состава позволило зафиксировать и описать колебания, соответствующие таким структурным элементам, как октаэдры $[(Ga/Al)O_6]$. Кроме того, был установлен вид тензора комбинационного рассеяния с использованием угловой зависимости интенсивности фононов. Экспериментальные результаты соответствуют теоретическим расчетам и подкреплены симметрийным анализом.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда №16-12-10456.

Список литературы

1. Gudim I. A., Magnetoelectric polarization of paramagnetic HoAl3-XGaX (BO3) 4 single crystals, Solid State Phenomena., Т. 215., С. 364-367, 2014;

2. Liang K. C., Giant magnetoelectric effect in HoAl 3 (BO 3) 4, Physical Review B., Т. 83., №. 18., С. 180417, 2011.

Светоиндуцированная линза в прозрачной наносуспензии

Овсейчук О. О.[1], Иванова Г. Д.[1], Иванов В. И.[1]

[1]ДвГУПС

Эл. почта: galigd2015@yandex.ru

Известно, что при воздействии светового поля на дисперсную среду с наночастицами возникают электрострикционные потоки, которые обуславливают наличие концентрационного механизма кубичной оптической нелинейности среды [1, 2].

Целью данной работы является теоретический анализ теплового вклада в формирование светоиндуцированной линзы в прозрачной дисперсной среде, обусловленного эффектом Дюфура [3].

Эффект Дюфура, обратный термодиффузионному эффекту Соре, заключается в возникновении теплового потока и градиента температуры в процессе взаимной диффузии компонентов бинарной системы под действием градиента концентрации одного из компонентов.

В качестве бинарной системы мы будем рассматривать жидкофазную среду с наночастицами (дисперсная фаза), находящуюся под воздействием лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности. Индуцированное излучением изменение концентрации частиц приводит к возникновению теплового потока, обуславливая, при этом, дополнительную к электрострикционной, тепловую нелинейность.

В работе получено точное аналитическое решение задачи светоиндуцированного тепломассопереноса. Найденные выражения определяют динамику концентрации и температуры в жидкофазной микрогетерогенной среде в поле гауссова светового пучка при отсутствии поглощения падающего излучения.

Получено выражение для светолинзового отклика среды в классической термолинзовой схеме. Полученные результаты представляют интерес для нелинейной оптики наносуспензий [4], а также для развития методов диагностики жидкофазных наноматериалов [5].

Список литературы

1. *Vicary L.* Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil *microemulsion* // Philosoph. Mag. B. 2002. V. 82. P. 447-452;
2. *Иванов В.И., Ливашвили А.И.* Самовоздействие гауссова пучка излучения в слое жидкофазной микрогетерогенной среды// Оптика атмосферы и океана. 2009. Том 22. № 8. С. 751-752;
3. *Ivanov V.I., Ivanova G.D*. A thermal lens response of the two components liquid in a thin film cell // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 735. P. 012037;

4. *Lee W., El-Ganainy R., Christodoulides D., Dholakia K., Wright E.* Nonlinear optical response of colloidal suspensions// Optics Express. 2009. V. 17(12). P. 10277-10289;
5. *Ivanov V.I., Ivanova G.D., Khe V.K.* Light induced lens response in nanosuspension // Proc. SPIE. 2016. V. 10176. P. 1017607.

Моделирование оптических схем малогабаритных спектрометров

Рамазанов А. Н.[1], Кострин Д. К.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: ramazanow.alexander@yandex.ru

Спектрометрическое оборудование на сегодняшний день применяется во многих областях науки и техники. Оно применяется для анализа металлов и сплавов, с помощью него измеряются параметры тонких пленок, его использование позволяет исследовать параметры источников излучения. Сейчас спектрометры применяются для экологического мониторинга водных ресурсов для определения состава сделанной пробы. Важным элементом современного малогабаритного спектрометра является оптическая схема. Учитывая то, что сейчас существует множество оптических схем и их разновидностей, следует грамотно выбирать среди них.

Основными оптическими схемами, используемыми в современных малогабаритных спектрометрах, являются схемы Черни-Тернера [1] и Пашена-Рунге [2], отличающиеся между собой количеством используемы элементов и спектральным разрешением.

Вначале производилось моделирование схемы Черни-Тернера «Х»-конфигурации, состоящий из двух вогнутых, одно из которых является коллиматором, другое выполняет роль фокусирующего зеркала, дифракционной решетки и вогнутой ПЗС-матрицы. К явным преимуществам системы можно отнести наличие малого количества оптических элементов, которые просты по своей конструкции. Недостатками схемы являются: наличие двойной дифракции, асимметрия входной щели и сложность юстировки. Последний недостаток можно компенсировать, предварительно промоделировав схему. В ходе проведения расчетов были получены оптимальные углы поворота зеркал, позволяющие добиться высокого спектрального разрешения и приемлемой калибровки длины полны по площади ПЗС-матрицы. Полученные графики позволяют говорить о правильном подборе углов, что сведет к минимуму трудности при юстировке оптической схемы.

Далее производилось моделирование оптической схемы Пашена-Рунге. Данная конструкция состоит всего из двух элементов: вогнутой дифракционной решетки, выполняющей функции как диспергирующего, так и фокусирующего зеркал, и ПЗС-матрицы. К особенностям схемы относится тот факт, что все оптические элементы должны располагаться на круге Роуланда. Если данное условие не будет выполнено, то оптическая схема будет давать неверные результаты. Схема обладает преимуществом по количеству элементов, но наличие вогнутой дифракционной решетки и условие по расположению на

круге Роуланда значительно усложняют юстировку схемы. Путем проведения моделирования были подобраны оптимальные расстояния, места расположения элементов относительно друг друга и углы поворота. Полученные результаты позволяют сказать, что спектральное разрешение схемы Пашена-Рунге значительно выше, чем у схемы Черни-Тернера.

Итогом проведенной работы стало моделирование двух оптических схем, которые на сегодняшний день чаще всего применяются в малогабаритных спектрометрах. Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что наиболее пригодной схемой для портативного устройства является конфигурация Пашена-Рунге, так как для оптимальной работы требуется лишь вогнутая дифракционная решетка и ПЗС-матрица, а также имеет более высокое спектральное разрешение, чем оптическая схема Черни-Тернера.

Список литературы

1. Czerny M., Turner A. F., Uber den Astigmatismus bei Spiegelspektrometern // Zeits fur Physik, Vol. 61, Mar. 11 1930. pp. 792-797;
2. Тарасов К. И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение, 1968. – 388 с.

Хемометрический анализ спектров комбинационного рассеяния для оценки пригодности костной ткани при производстве биоимплантатов

Фролов О. О.[1], Тимченко П. Е.[1], Тимченко Е. В.[1], Волова Л. Т.[2]

[1]Самарский университет
[2]СамГМУ

Эл. почта: owl.63@ya.ru

Обеспечение полной регенерации костной ткани в области дефектных участков кости, несмотря на накопленные знания в этом вопросе — одна из острейших проблем современной медицины. Решить её можно, создав оптимальные условия для регенераторных процессов в зонах её резорбции. Один из путей — использование костнопластических материалов [1]. Среди них аллогенные имплантаты из тканей человека являются оптимальными материалами для реконструкции повреждений опорно-двигательной системы [2]. Также с принятием федерального закона от 23 июня 2016 г. N 180-ФЗ "О биомедицинских клеточных продуктах" по многим причинам становится выгодным использование аллогенного биомедицинского клеточного продукта на основе прижизненных донорских материалов. В связи с этим актуальной задачей является создание оптимального протокола изготовления костных имплантатов на основе прижизненно резецированной костной ткани.

В рамках замкнутого цикла безотходного производства биоимплантатов, возможно получение деминерализованного костного матрикса, который в отличие от синтетиче-

ских материалов, кроме солей кальция и фосфора содержит микроэлементы и глюкозаминогликаны в тех же пропорциях, в каких они находятся в костной ткани человека.

Качество производимого имплантата, которое напрямую влияет на степень его приживаемости, сейчас проверяется с помощью биохимического, гистологического и цитологического анализов. Эти анализы требуют значительного количества времени и повреждают объект исследования. Использованный способ диагностики костных имплантантов с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеивания этих недостатков лишен.

Цель работы: спектральная оценка пригодности прижизненно резецированной губчатой костной ткани при производстве биоимплантатов.

Объектами исследования являлись образцы биоимплантов губчатой кости в форме куба размерами 5×5×5 мм, изготовленные по технологии «Лиопласт»®: деминерализованные и минерализованные образцы из кадаверной костной ткани и прижизненно резецированной костной ткани, полученные при эндопротезировании тазобедренного сустава.

В качестве основного метода исследований биоимплантов был выбран метод спектроскопии комбинационного рассеяния, реализуемый с помощью высокоразрешающего спектрометра Shamrock sr-303i со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, обеспечивающей спектральное разрешение 0,15 нм, и лазерного модуля LuxxMaster LML-785.0RD-04. Диапазон сканирования длин волн от 190 нм до 1200 нм; разрешение камеры 1024×255 пикселей, мощность лазера до 500 мВт [3]. Дополнительно был проведен биохимический анализ образцов исследований.

В результате исследований:

- Установлены особенности спектров комбинационного рассеяния для образцов аллогенной костной ткани, изготовленных из кадаверной ткани и головок бедренных костей, резецированных во время операции эндопротезирования тазобедренного сустава.
- Деконволюция спектров методом подбора спектрального контура и деконволюции функции Гаусса позволяет провести расширенный компонентный качественный и количественный анализ биоимплантатов на основе костной ткани по содержанию основных показателей биоматрикса.
- Введены коэффициенты и проведён PCA-LDA анализ. Результаты исследований, полученные методом спектроскопии комбинационного рассеяния, были сопоставлены с традиционным биохимическим анализом.

Список литературы

1. Муслимов С.А. Морфологические аспекты регенеративной хирургии,Уфа: Башкортостан, 168 с, 2000;
2. Савельев В.И., Корнилов Н.В., Иванкин Д.Е., Линник С.А, Аллотрансплантация формалинизированной костной ткани в травматологии и ортопедии, СПб.: МОРСАРАВ, 208 с., 2001;
3. Тимченко П.Е., Тимченко Е.В., Жердева Л.А., Белоусов Н.В., Волова Л.Т., Россинская В.В., Болтовская В.В., Пугачев Е.И., Оптические методы контроля клеточно-тканевых имплантатов, находившихся в условиях невесомости, Краткие

сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук, Т. 42. № 10, С. 39-44, 2015.

Спектральный анализ имплантов из твердой мозговой оболочки

Кийко Н. К. [1], Тимченко П. Е. [1], Тимченко Е. В. [1], Фролов О. О.[1], Кулабухова А. Ю. [1], Волова Л. Т.[2]

[1]Самарский университет
[2]СамГМУ

Эл. почта: nikitosvanilla@gmail.com

В современной стоматологии проблема восстановления тканей атрофированной десны, как в области обнаженных шеек зубов, так и при адентии, является чрезвычайно актуальной [1]. Начиная с 20 века было предложено множество хирургических методик и их модификаций для закрытия рецессий десны: методика коронально смещенного лоскута в комбинации со свободным соединительнотканным трансплантатом (ССТ), технику «конверта» для закрытия одиночных рецессий, микрохирургическая тоннельная техника для устранения множественных рецессий. Множественные рецессии десны встречаются в клинической практике значительно чаще, чем одиночные.

Впервые в мировой практике при этой патологии в качестве пластического материала предлагается использовать аллогенную твердую мозговую оболочку (ТМО) человека, изготовленную по оригинальной отечественной технологии "Лиопласт» ®". Для оценки состава биологических тканей необходимо использовать оптические методы контроля, которые являются неинвазивными. Одним из наиболее распространенных оптических методов оценки качества биоимплантата является спектроскопия комбинационного рассеяния. Спектроскопия комбинационного рассеяния позволяет в режиме реального времени проводить неразрушающий, количественный и качественный анализ состава биологических объектов и обеспечивает информацию о молекулярной структуре с высоким пространственным разрешением. Для осуществления полноценного спектрального анализа необходимо применять математические методы разложения спектрального контура [2]. Для разделения такого комплекса на компоненты и улучшения разрешения полос в спектре КР, были использованы методы Фурье-деконволюции и подбора спектрального профиля (моделирования спектра).

Цель работы: проведение сравнительной оценки компонентного состава поверхностей биоимплантов из твердой мозговой оболочки при различной их обработке.

Объектами исследования являлись образцы твёрдой мозговой оболочки (ТМО) размером 10×10 мм, обработанные по технологии «Лиопласт»® (ТУ-9398-001-01963143-2004).

В качестве основного метода анализа биоимплантов был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, реализуемый с помощью экспериментального стенда, включающий в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-

303i, совмещенный с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны 785 нм) и встроенную охлаждаемую камеру DV420A-OE, обеспечивающую спектральное разрешение 0,15 нм (спектральный диапазон 200-1200 нм).

В результате проведенных исследований:

– Получена сравнительная спектральная оценка компонентного состава поверхностей образцов имплантатов на основе твёрдой мозговой оболочки, изготовленных по технологии «Лиопласт», после проведенной ультразвуковой обработки и без нее.

– Деконволюция спектров методом подбора спектрального контура и деконволюции функции Гаусса позволяет провести расширенный компонентный качественный и количественный анализ биоимплантатов на основе твердой мозговой оболочки по содержанию основных показателей биоматрикса: коллагенов, протеинов, гликозаминогликанов, протеогликанов, ДНК / РНК.

Список литературы

1. Ганжа И. Р. Рецессия десны. Диагностика и методы лечения: учебное пособие для врачей, Самара: Содружество, 84 с., 2007;
2. Timchenko E.V., Timchenko P.E., Volov L.T., Dolgushkin D.A., Shalkovsky P.Y., Pershutkina S.V., Detailed spectral analysis of decellularized skin implants, Journal of Physics: Conference Series, 737, 012050, pp.1-4, 2016.

Применение метода спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки качества хонропластики в эксперименте на кроликах

Маркова М. Д.[1], Тимченко Е. В.[1], Тимченко П. Е.[1], Долгушкин Д. А[2]., Волова Л. Т.[2], Лазарев В. А.[2], Тюмченкова А. С. [1], Тихомирова Г. П. [1]

[1]Самарский университет
[2]СамГМУ

Эл. почта: MarkovaMashulka@yandex.ru

Проблема восстановления дефектов суставной поверхности является актуальной в современной травматологии и ортопедии. Нелеченый дефект суставного хряща приводит к прогрессированию деструктивных процессов, развитию остеоартроза. Одним из способов восполнения дефектов является их пластика биологическими или искусственными материалами. В составе этих материалов могут находиться вещества, стимулирующие регенерацию хрящевой ткани. Оценка качества регенерата – сложное дело. Как, правило, для такой оценки необходима биопсия хряща и его гистологическое исследование. Метод скрининговой оценки качества регенерата после хондропластики до сих пор не найден.

Целью исследование явилось применение метода спектроскопии КР для оценки качества хрящевого регенерата суставной поверхности в эксперименте у кроликов.

Материалом исследования стали костно-хрящевые биоптаты, полученные из зон хондропластики дефектов коленных суставов кроликов. Были исследованы две группы образцов – биоптаты после пластики дефектов обогащенной тромбоцитами плазмой (ОТП) и биоптаты после пластики дефектов бионосителями с ОТП.

Образцы исследовали с помощью стенда, реализующего метод СКР. Стенд включал в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i со спектральным диапазоном 200-1200 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно-оптический зонд RPB-785 для спектроскопии КР, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 с длиной волной лазерного излучения 785 нм и с шириной линии 0,2 нм [1].

Обработка спектров была проведена в программной среде Wolfram Mathematica 10 и заключалась в удалении шумов сглаживающим медианным фильтром по 7 точкам. Затем на выбранном интервале 300-2200 $см^{-1}$ при помощи итерационного алгоритма [2] определяли аппроксимирующую линию (полином пятой степени) автофлуоресцентной составляющей и затем вычитали эту составляющую, получая выделенный спектр КР. Погрешность используемых коэффициентов не превышала 4%. Использован метод Фурье-деконволюции и подбора спектрального профиля методом наименьших квадратов для повышения разрешения и информативности спектра в программной среде MagicPlotPro 2.7.2.

Проведена сравнительная спектральная оценка поверхностей хрящевых регенератов коленных суставов кроликов. Деконволюция спектров методом подбора спектрального контура и деконволюции функции Гаусса позволила провести расширенный компонентный качественный и количественный анализ суставных поверхностей после выполнения хондропластики разными способами. Установлены основные спектральные различия для 2-х групп исследуемых объектов и введены коэффициенты, позволяющие верифицировать качество хрящевых регенератов после применения разных видов хондропластики.

Список литературы

1. Тимченко П.Е., Тимченко Е.В., Жердева Л.А., Белоусов Н.В., Волова Л.Т., Россинская В.В., Болтовская В.В., Пугачев Е.И. Оптические методы контроля клеточно-тканевых имплантатов, находившихся в условиях невесомости, Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. Т. 42. № 10. С. 39-44, 2015;
2. ZHAO J., LUI H., MCLEAN D. I., ZENG H. Society for applied spectroscopy, 61(11), 1225–1232, 2007.

Усиление эффекта Фарадея в магнитоплазмонных двумерных кристаллах за счет возбуждения ортогональных плазмонных колебаний

Кричевский Д. М.[1], Кузьмичев А. Н.[2], Калиш А. Н.[1,2], Белотелов В. И.[1,2]

[1]МГУ им. М. В. Ломоносова
[2]РКЦ

Эл. почта: dm.krichevsky@physics.msu.ru

Среди различных оптических эффектов магнитооптические эффекты занимают одно из основных мест, что обусловлено возможностью модулировать поляризацию или интенсивность оптического излучения в широком диапазоне частот. Особый интерес вызывают метал-диэлектрические структуры, позволяющие усиливать магнитооптические эффекты за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов на поверхности раздела металл-диэлектрик, при этом значительно уменьшая толщину образца и увеличивая пропускание света [1].

В данной работе проведено теоретическое моделирования пропускания и угла Фарадея в магнитоплазмонных двумерных структурах на основе перфорированной пленки золота и прилегающего к нему магнитооптического слоя – висмут-замещенного иттриевого феррит-граната. Показано, что при толщине магнитооптического слоя ниже критической толщины волноводного распространения света может быть достигнуто значительное усиления угла поворота Фарадея, вызванное прежде всего возбуждением ортогональных плазмонных колебаний на границе раздела пленки перфорированного золота и магнитного диэлектрика при нормальном падении света. Возможность возбуждения ортогональных плазмонных мод обуславливается наличием намагниченности диэлектрического слоя, вектор которой перпендикулярен плоскости образца. Моделирование коэффициента пропускания света и угла поворота Фарадея выполнено с использованием метода связных мод в пространстве Фурье [2] и метода матриц переноса [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МД-1615.2017.2) и Фонда развития теоретической физики «БАЗИС».

Список литературы

1. V. I. Belotelov, I. A. Akimov, M. Pohl, V. A. Kotov, S. Kasture, A. S. Vengurlekar, Achanta Venu Gopal, D. R. Yakovlev, A. K. Zvezdin, M. Bayer, Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals, NATURE NANOTECHNOLOGY, Vol. 6, pp. 370-376, 2011;
2. M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet, T. K. Gaylord, Formulation of stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings, JOSA A, Vol. 12, pp. 1068-1076, 1995;
3. J. Hamrle, Magneto-optical determination of the in-depth magnetization profile in magnetic multilayers, Université Paris-Sud XI, Orsay and Charles University in Prague: PhD thesis, 200 p., 2003.

Оптически когерентное торможение нанокристаллов, легированных ионами иттербия

Вовк Т. А.[1], Иванов А. В.[1], Рождественский Ю. В.[1]

[1]ИТМО

Эл. почта: tatiana.a.vovk@gmail.com

Мы предлагаем новый метод оптического охлаждения, позволяющий охладить трансляционную температуру (температуру, соответствующую внешнему движению) нанокристалла до 10^{-13} К и достичь температуры квантового предела, т.е. температуры, при которой нанокристалл переходит в макроскопическое квантовое состояние. В таких состояниях дебройлевская длина волны объекта становится сравнимой с диаметром объекта или превышает его, а сам объект обладает единой волновой функцией и проявляет квантовые свойства в трансляционных степенях свободы [1]. Охлаждение нанокристалла по внешним степеням свободы производится за счет последовательного воздействия на примесные центры Yb^{3+} рамановских π-импульсов [2]. Для эффективного охлаждения нанокристалла в схеме может быть предусмотрена радиочастотная ловушка Пауля для локализации охлаждаемой частицы в области перекрытия лазерных пучков [1].

Рассмотрим нанокристалл флюорита (CaF_2) массы $M \sim 10^{-17}$ г и радиуса $R \sim$ 10-100 нм (что соответсвует плотности кристаллической матрицы ~ 3-5 г/см^3), легированный ионами иттербия (Yb^{3+}), испытывающий свободное падение в вакуумной камере. При этом нанокристалл подвергается воздействию двухфотонных π-импульсов с частотами ω_1 и ω_2, соответствующими переходам $4f \rightarrow 5d$ в Yb^{3+} и сильно отстроенных от резонанса (условие рамановского охлаждения [2]). За счет такого воздействия часть ионов иттербия в нанокристалле взаимодействует с полями π-импульсов и совершает двухквантовый переход $^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$, минуя возбужденный уровень $^1D_{5/2}$. Таким образом, происходит когерентный перенос населенности с $^2F_{7/2}$ на $^2F_{5/2}$. При этом за счет поглощения фотонов нанокристаллу сообщается суммарный импульс двухфотонной отдачи $n\hbar(k_1 + k_2)$, где $n = Np$ – количество ионов иттербия из N находящихся в нанокристалле, которые поглощают фотоны с вероятностью p. Переданный нанокристаллу импульс, противоположный направлению его падения, существенно уменьшает его мгновенную скорость, за счет чего и происходит трансляционное торможение. Долгоживущий уровень $^2F_{5/2}$ иона иттербия спустя $\approx 10^{-3}$ с распадается на уровень $^2F_{7/2}$, при этом испускается фотон частоты ω_3, соответствующей ИК-диапазону, с импульсом $\hbar k_3 << \hbar(k_1 + k_2)$, имеющий случайное направление и не оказывающий существенного влияния на трансляционную динамику нанокристалла.

Испущенный фотон частоты ω_3 ИК-диапазоне и его энергия отдачи $E_r = (\hbar k_3)^2/2M = k_B T$, где k_B – постоянная Больцмана, в конечном итоге и определеяют предельную температуру T нанокристалла: $T = (\hbar k_3)^2/(2M\, k_B) \sim 10^{-13}$ K. Такая температура соответсвует неопределенности скорости $\Delta v = (2E_r/M)^{1/2}$ и координаты $\Delta z \approx \hbar/(M\Delta v)$ (следует из соотношения неопределенностей). Нанокристалл проявляет макроскопические квантовые свойства, когда его размер становится меньше по сравнению с неопределенностью Δz:

$\Delta z/R \approx (k_3 R)^{-1} \sim$ 1-20, для $R \sim$ 10-100 нм. Получается, что неопределенность координаты для охлажденного нанокристалла может превышать его размеры в единицы и десятки раз.

Таким образом, нанокристалл переходит в макроскопическое квантовое состояние. Нанообъекты в таком состоянии могут быть использованы для фундаментальных исследований в области квантовой механики и физики твердого тела, применены для биохимических задач [3].

Список литературы

1. Rudyi S. S. et al., Deep laser cooling of rare-earth-doped nanocrystals in a radio-frequency trap, J. Opt. Soc. Am. B, 34, 2441-2445, 2017;
2. Ivanov V. S., Rozhdestvensky Y. V., Suominen K. A., Efficient two-dimensional sub-recoil Raman cooling of atoms in a tripod configuration, Phys. Rev. A, 83, 023407, 2011;
3. Romero-Isart O. et al., Toward quantum superposition of living organisms, New J. Phys., 12, 033015, 2010.

Спектроскопия комбинационного рассеяния для оценки экстраклеточных матриксов аортальных клапанов сердца в процессе их изготовления

Шалковская П. Ю.[1], Тимченко Е. В.[1], Тимченко П. Е.[1], Волова Л. Т., Трапезников Д. С.[1]

[1]Самарский университет
[2]СамГМУ

Эл. почта: pshalkovskaya@mail.ru

В настоящее время смертность от заболеваний сердечно-сосудистой системы по статистике составляет 60% от всех смертей. Одним из способов решения уменьшения смертности населения от сердечно-сосудистых заболеваний является замена изношенных клапанов сердца имплантатами. Важным этапом получения сердечного биоимплантата является процесс децеллюляризации, который позволяет предотвратить осложнения, связанные с пересадкой нативных материалов.

На сегодняшний день не существует универсальной методики децеллюлязации клапанов сердца. Также отсутствуют общепризнанные способы контроля её эффективности. С этой целью на данный момент используют гистологические, гистохимические, биохимические и иммунологические методы. Основным их недостатком, наряду с трудоемкостью и дороговизной, является деструкция анализируемых образцов [1]. Поэтому в процессе децеллюляризации необходимо провести поиск оптимальных способов анализа качественного состава клапанов, который является актуальной задачей.

Метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) может быть эффективен при оценке эффективности децеллюляризации поверхности образцов клапанов сердца [2].

В качестве объектов исследований были использованы образцы створок аортальных клапанов сердца, изготовленных по различным протоколам децеллюризации. Для 1 группы образцов проводили децеллюризацию на базе Института экспериментальной медицины и биотехнологий СамГМУ, для 2 группы образцов децеллюризацию проводили согласно протоколу, предоставленным профессором А. Лихтенбергом (Дюссельдорф, Германия) [3], 3 группа образцов была нативная.

Спектральные характеристики образцов изучались с помощью экспериментального стенда, включающего в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i с встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно-оптический зонд для спектроскопии комбинационного рассеяния RPB785, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (с регулируемой мощностью до 500 мВт, длина волны 785 нм). Выделение КР спектра на фоне автофлуоресценции производилось методом вычитания полиномиальной аппроксимации флуоресцентной составляющей. Для уменьшения шумов в спектре использовался медианный фильтр.

- В ходе исследований был проведен сравнительный спектральный анализ 3-х исследуемых групп створок аортальных клапанов сердца.
- Были введены коэффициенты и построены двумерные зависимости, позволяющие оценить эффективность процесса децеллюляризации экстраклеточных матриксов аортальных клапанов сердца в процессе их изготовления.
- Результаты исследований подтверждены биохимическим анализом.

Список литературы

1. He M., Callanan A. Comparison of methods for whole-organ decellularization in tissue engineering of bioartificial organs // Tissue Eng Part B Rev. 2013. V.3. № 19. P. 194-208;
2. Enrique Uceda Otero, Sokki Sathaiah, Landulfo Silveira Jr., Pablo Maria Alberto Pomerantzeff, Carlos Augusto Gonçalves Pasqualucci Raman spectroscopy for diagnosis of calcification in human heart valves // Spectroscopy IOS Press, 2004. 18. Pp. 75–84;
3. Lichtenberg A., Tudorache I., Cebotari S. et al. A Preclinical testing of tissue-engineered heart valves re-endothelialized under simulated physiological conditions. Circulation 2006; 114(1 Suppl): I559-65.

Электрический и магнитный отклики в диэлектрических метаматериалах

Маслова Е.[1,2]

[1]ФТИ
[2]ИТМО

Эл. почта: ripchinskaya@gmail.com

Метаматериалы (ММ) – искусственные композитные среды, свойства которых определяются резонансными эффектами на отдельных структурных элементах, а так же периодичностью структуры. ММ характеризуются широким спектром значений эффективных параметров: коэффициента преломления, диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости. Ведутся работы над созданием ММ с отрицательными, нулевыми, а также большими значениями эффективных параметров. Кроме того, ММ могут иметь отрицательные значения коэффициента преломления, что обусловлено отрицательными значениями обоих эффективных параметров: диэлектрической и магнитной проницаемости.

На данный момент большой интерес к ММ обусловлен будоражащими воображение применениями ММ для создания маскирующих покрытий типа «плащ-невидимка», суперлинз и др., что становится возможным благодаря контролируемым эффективным магнитным и электрическим параметрам среды.

Необычные эффективные параметры можно получить, используя металлические структуры, но такие ММ имеют существенные потери в видимом диапазоне. Однако в последнее время было показано, что получить отрицательное значение эффективной магнитной проницаемости можно и в структуре с прозрачными элементами, обладающими высоким значениями диэлектрической проницаемости благодаря резонансам Ми [1]. Такие диэлектрические ММ (ДММ) позволяют формировать резонансный магнитный отклик в структуре, сделанной из диэлектрических материалов.

Возможная область возникновения ДММ ограничена параметрами структуры (тип кристаллической решётки, геометрические размеры, диэлектрическая проницаемость). Изменяя эти параметры, авторы работы [2] построили фазовую диаграмму «фотонный кристалл – метаматериал» для случая квадратной решётки диэлектрических цилиндров.

Хорошо известно, что магнитные резонансы Ми могут приводить к возникновению резонансных особенностей в эффективной магнитной восприимчивости. Однако режим метаматериала для электрических резонансов до сих пор не был исследован.

В данной работе рассматриваются периодическая структура диэлектрических однородных цилиндров, отличающихся типом кристаллической решётки. Помимо этого, переменными параметрами в структурах являются диэлектрическая проницаемость цилиндров и коэффициент заполнения решётки.

В процессе работы были построены и проанализированы фазовые диаграммы «фотонный кристалл – метаматериал» для разных типов кристаллической решётки. При этом нам удалось впервые найти параметры структуры, при которых существуют резо-

нансные особенности в эффективной диэлектрической проницаемости за счёт электрических резонансов Ми в ТМ поляризации. Из диаграммы видно, что фазовые переходы для ТМ поляризации происходят в более узком диапазоне коэффициента заполнения по сравнению с ТЕ поляризацией, в которой существуют хорошо известные резонансные особенности в эффективной магнитной восприимчивости. Это связано с тем, что уже при небольшом увеличении коэффициента заполнения цилиндры образуют обобщённые ТМ моды.

В качестве примера в работе рассматривается призма с нулевым эффективным показателем преломления. Призма образованна ДММ с квадратной решёткой. Расчёты показывают, что независимо от ориентации кристаллических осей относительно границ призмы электромагнитное поле оказывается однородным по всему объёму структуры, что подтверждает переход структуры в режим ММ с нулевым эффективным показателем преломления.

Список литературы

1. Kuznetsov A.I., Miroshnichenko A.E., Brongersma M.L., Kivshar Y.S., Luk'yanchuk B., Optically resonant dielectric nanostructures, Science, 354, aag2472, 2016;
2. Rybin M.V., Filonov D.S., Samusev K.B., Belov P.A., Kivshar Y.S., Limonov M.F., Phase diagram for the transition from photonic crystals to dielectric metamaterials, Nature Communications, 6, 10102, 2015.

Исследование наногетероструктур на основе полупроводниковых нитридов методом фотолюминесценции

Ларченко А. С.[1], Ваталев О. С.[1], Ведель Е. В.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: larchenko_a@inbox.ru

В настоящее время наногетероструктуры на основе полупроводниковых нитридов являются широко востребованными материалами для создания коротковолновых светодиодов синего и зеленого оптических диапазонов, а также белых светодиодов, находящих применение в производстве осветительного оборудования.

Нитрид галлия (GaN) является широкозонным полупроводником, что позволяет ему быть достаточно перспективным материалом в таких областях электроники, как силовая электроника и СВЧ-электроника.

Для исследования наногетероструктур на основе полупроводниковых нитридов был применен метод фотолюминесценции. Данный метод является довольно простым, не разрушает сами структуры, не требует их дополнительной обработки. В результате проведения экспериментов можно судить о качестве приводимых структур и давать заключение на соответствие их спецификации.

В работе были исследованы светодиодные структуры пяти типов. Типы структур различаются технологическими параметрами выращивания, а именно плотностью дислокаций. Метод выращивания MOCVD. На сапфировой подложке Al_2O_3 выращивается буферный слой GaN, затем высоколегированный слой GaN. Активная область представляет собой множественные квантовые ямы InGaN, разделенные барьерами GaN. Далее на GaN методом термического осаждения наносится верхний контактный слой.

По полученным спектрам ФЛ было проанализировано качество структур, исследованы отдельные полосы фотолюминесценции и причины их возникновения. Вследствие различной плотности дислокаций структуры характеризуются различными пиками на спектре ФЛ. Например, структуры типов 1, 3 и 5 имеют наиболее интенсивные пики в районе 560 нм (2,2 эВ) – полосы излучения желтой люминесценции, причиной возникновения которых является комплекс, образованный вакансией Ga (глубокий акцептор) и кислородом в азотных вакансиях (мелкий донор). Структуры типов 2 и 4 имеют более интенсивные пики люминесценции в районе 360 нм (3,4 эВ) – полосы излучения ультрафиолетовой люминесценции. Данная полоса возникает из-за неглубокой рекомбинации донорно-акцепторной пары. Для повышения эффективности фотолюминесценции и уменьшения вклада фононной составляющей были измерены спектры ФЛ при низких температурах с использованием жидкого азота. Это позволило выявить и проанализировать эффекты, происходящие в активной области структуры, содержащей в себе множественные квантовые ямы InGaN/GaN.

Таким образом, результаты исследований показали, что среди стуруктур типов 1, 3, 5, имеющих пики излучения МКЯ InGaN/GaN, наилучшим качеством обладает структура типа 1. Она обладает наименьшим соотношением интенсивностей пика в районе 560 нм, связанного с дефектами, и пика излучения МКЯ InGaN/GaN. Из структур типов 2 и 4, не проявивших в спектрах ФЛ пики излучения МКЯ InGaN/GaN из-за наличия дислокаций на гетерогранице, лучшим качеством обладает структура типа 4, так как соотношение пиков ФЛ меньше, чем у структуры типа 2.

Обратный поток вектора Пойнтинга при острой фокусировке оптических вихрей

Стафеев С. С.[1,2], Налимов А. Г.[1,2], Котляр В. В.[1,2]

[1]ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ Кристаллография и фотоника РАН
[2]Самарский университет

Эл. почта: sergey.stafeev@gmail.com

В последние годы отмечается рост интереса исследователей к фокусировке оптических вихрей [1 – 3]. Так, например, в [1] было показано, что азимутально поляризованный оптический вихрь образует фокусное пятно с площадью ($0{,}147\lambda^2$) на 13,5 % меньше, чем радиально поляризованный свет ($0{,}17\lambda^2$). Аналогичный пучок использовался в рабо-

те [2] для формирования иглоподобного фокуса с большой глубиной (12λ) и субволновой шириной (изменялась от 0,42λ до 0,49λ). А в работе [3] иглоподобный фокус имел диаметр по полуспаду 0,38λ, а глубину 7,48λ.

Интересно, что при исследовании таких пучков внимание исследователей сосредоточенно на достижении минимального размера фокусного пятна. Так как при вычислении интенсивности необходимо вычисление только электрической напряжённости в фокусе, то изучению поведения магнитной компоненты обычно уделяется мало внимания. Знание последней необходимо для изучения поведения вектора Пойнтинга. В соответствии с [4] сила, действующая на частицу может быть вычислена как $F=(k/2)\mathrm{Im}\alpha\mathrm{Re}(E\times H^{*})$, где k – волновое число, α – поляризуемость частицы, E и H – напряжённости электрического и магнитного полей, соответственно. Из формулы выше следует, что продольная составляющая силы будет пропорциональна продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z. Если некоторый пучок в своём поперечном распределении S_z будет содержать отрицательную составляющую, то частица, подсвеченная таким пучком, должна двигаться в сторону источника света. В работе [5] моделировалось прохождение света через металинзу, осуществляющую поворот направления поляризации и фокусировку. Численно с помощью FDTD метода было показано, что такая линза, освещаемая светом с круговой поляризацией, может формировать фокусное пятно, в котором поток энергии вдоль оси распространения пучка S_z имеет отрицательное значение.

В данной работе нами с помощью формул Ричардса-Вольфа моделировалась фокусировка оптических вихрей с длиной волны λ=532 нм и круговой поляризацией плоской дифракционной линзой с числовой апертурой NA=0,95. Результаты, полученные с помощью формул Ричардса-Вольфа качественно совпадали с результатами, полученными методом FDTD, реализованным в программном обеспечении FullWave. Рассматривалась острая фокусировка оптических вихрей с топологическими зарядами равными ±1 и ±2. Было показано, что при фокусировке оптических вихрей с круговой поляризацией широкоапертурной дифракционной линзой в фокусе можно наблюдать отрицательные значения продольной компоненты вектора Пойнтинга. При фокусировке оптических вихрей с левой круговой поляризацией и топологическими зарядами ±1 и +2 распределение отрицательных значений продольной компоненты вектора Пойнтинга имеет вид колец. Если же топологический заряд оптического вихря равен -2, то это распределение приобретает пиковый характер.

Список литературы

1. Hao X., Kuang C., Wang T., Liu X., Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam, Optics Letters, 35, 3928-3930, 2010;
2. Qin F., Huang K., Wu J., Jiao J., Luo X., Qiu C., Hong M., Shaping a subwavelength needle with ultra-long focal length by focusing azimuthally polarized light, Scientific Reports, 5, 09977, 2015;
3. Wang S., Li X., Zhou J., Gu M., Ultralong pure longitudinal magnetization needle induced by annular vortex binary optics, Optics Letters, 39, 5022-5025, 2014;

4. Sukhov S., Dogariu A., On the concept of “tractor beams”, Optics Letters, 35, 3847-3849, 2010;
5. Котляр В.В., Налимов А.Г., Формирование и фокусировка векторного оптического вихря с помощью металинзы, Компьютерная оптика, 41, 645-654, 2017.

Анализ спектральных особенностей модели остеопороза костной ткани крыс и эффективности его лечения гидроксиапатитом

Тюмченкова А. С.[1], Тимченко Е. В.[1], Тимченко П. Е.[1], Писарева Е. В.[1], Власов М. Ю.[2], Волова Л. Т.[2], Федорова Я. В.[1]

[1]Самарский университет
[2]СамГМУ

Эл. почта: a.tyumchenkova@gmail.com

Изучение костно-хрящевых материалов на сегодняшний день является актуальной задачей. Это связано с тем, что они играют в организме человека важную роль, обеспечивая возможность движения и участвуя в обмене минеральных веществ. Однако с возрастом соотношение неорганических и органических веществ изменяется в пользу неорганических, что ведет к частым травмам и развитию заболеваний [1]. Одним из самых распространенных заболеваний является остеопороз [2]. Он характеризуется снижением массы и ухудшением качества костной ткани. В результате чего кость становится хрупкой и склонной к переломам. Что отрицательно сказывается на качестве жизни, а в случаях сложных переломов может приводить к летальному исходу. Тем не менее главным препятствием перед эффективным лечением всех видов патологий костно-хрящевой ткани является поздняя диагностика заболеваний [3, 4].

Целью работы являются спектральные исследования костной ткани крыс при моделировании остеопороза с оценкой эффективности его лечения гидроксиапатитом. Исследования были проведены с помощью экспериментального стенда. Стенд включал в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i со спектральным диапазоном 200-1200 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно-оптический зонд RPB-785 для спектроскопии КР, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 с длиной волной лазерного излучения 785 нм и с шириной линии 0,2 нм. Эксперимент проводился на половозрелых самках крыс возрастом 6-9 месяцев и массой 180-230 г. В качестве материалов исследования были использованы бедренные кости крыс. Кости распиливались продольно. Шлифы костей были измерены в областях головки, диафиза и эпифиза костей, однако наибольший интерес представляет головка кости, т.к. в этой области велика вероятность проявления остеопороза. Головки костей, исследуемых образцов, были измерены в 17 точках. Помимо этого, кости подвергались анализу на механическую прочность на излом и на прогиб.

Разложение спектрального контура проводилось методом Фурье-деконволюции. Основные спектральные различия выявлены на интенсивностях линий 428 $см^{-1}$, 581 $см^{-1}$,

854 $см^{-1}$, 956 $см^{-1}$, 1033 $см^{-1}$, 1062 $см^{-1}$, 1244-1271 $см^{-1}$ и 1659 $см^{-1}$. Также были введены коэффициенты, характеризующие компонентный состав образцов костей и позволяющие оценить эффективность лечения модели остеопороза. Полученные результаты свидетельствуют о положительном эффекте лечения гидроксиапатитом модели остеопороза начального этапа развития.

Результаты исследований подтверждены проведенными механическими испытания.

Список литературы

1. Akkus O., Adar F., Schaffler M. B., Age-related changes in physicochemical properties of mineral crystals are related to impaired mechanical function of cortical bone, Bone, 3, 443-453, 2004;
2. Михайлов Е. Е., Беневоленская Л. И., Руководство по остеопорозу, М.: Бином. Лаборатория знаний, Т. 10, 2003;
3. Берченко Г. Н., Шугаева О. Б.,Трудности диагностики хондросарком кости различной степени злокачественности, Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи, №. 4, 21-29, 2011;
4. Олюнин Ю. А., Остеоартроз. Актуальные вопросы диагностики и лечения, Русский медицинский журнал, № 7, 2012.

Рамановская и ЗИР спектроскопия сверхвысокого изотопического разрешения для задач биомедицины

Гришканич А. С.[1], Рузанкина Ю. С.[1], Жевлаков А. П.[1], Чубченко Я. К. [1], Конопелько Л. А.[1]

[1]ИТМО

Эл. почта: grishkanich@ya.ru

Стресс – важная системная адаптивная реакция, реализующаяся на разных уровнях жизнедеятельности организма, прежде всего на молекулярном уровне, а также и на уровне вегетативных систем, сенсорных систем, нервной системы и поведения. Острое стрессорное воздействие активирует и синхронизирует физиологические процессы, направленные на повышение адаптационных возможностей организма и его выживание. Эти процессы включают высвобождение глюкокортикоидных гормонов для мобилизации энергетических ресурсов и модуляции иммунных реакций; увеличение сердечного ритма, артериального давления и дыхания; изменения моторики желудочно-кишечного тракта; увеличение уровня возбуждения; и изменение поведения. В отличие от позитивного адаптивного действия острого стресса, хронический стресс оказывает негативное действие, он может вызывать нарушение деятельности жизненно важных систем организма и приводить к ряду заболеваний. Состав выдыхаемого воздуха и испарений с поверхности кожи человека тесно взаимосвязаны с процессами, протекающими в организме, что и предопределило возможность рассмотрения их в качестве ценного диагностического инструмента. Компоненты выдыхаемого воздуха и испарений с поверхности

кожи являются хемосигналами социальной коммуникации и имеют ряд преимуществ перед такими каналами коммуникации, как речь, прикосновение, биологическое движение и мимика.

В работе с помощью методов спектроскопии затухания излучения в резонаторе (далее ЗИР), а также рамановской спектроскопии сверхвысокого изотопического разрешения, которые обеспечивают на порядок более низкий порог обнаружения и лучшее быстродействие, чем альтернативные методы измерений, были изучены вещества-индикаторы стресс состояний. Этим обусловлена актуальность применений для высокочувствительного спектрального анализа состава выдыхаемого воздуха. Привлекательной стороной диагностики, основанной на анализе химического состава выдыхаемого воздуха, является возможность исследовать процессы, происходящие в живом организме без вторжения в него, т. е. неинвазивно, и в реальном времени.

В результате исследований молекулярных метаболитов в выдыхаемом воздухе здорового человека в покое идентифицированы кортизол, оксикетоны, главным образом 1-гидрокси-пропанона-2 (ацетол), альдегиды (деценаль, бензальдегид), ацетофенон, фенол и жирные кислоты. При выполнении физической нагрузки (окислительный стресс) содержание кетонов (гептанон-2, гептанон-3), фенола и идентифицированных альдегидов (деценаль, октадеценаль) и ацетола в выдыхаемом воздухе обследованных достоверно снижалось. Показано, что динамика концентраций насыщенных углеводородов в выдыхаемом воздухе может быть информативным показателем для оценки реакции организма на окислительный стресс, а уровень ацетола использован и в качестве индикатора тренированности человека, и как показатель развития гипоксических состояний.

Список литературы

1. Grishkanich, A., Chubchenko, Y., Elizarov, V., Zhevlakov, A., & Konopelko, L. SRS-sensor 13C/12C isotops measurements for detecting Helicobacter Pylori //Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XVIII. – International Society for Optics and Photonics, 2018. – Т. 10488. – С. 104881A.;

Многочастотный оптически детектируемый магнитный резонанс нулевого поля в азотно-вакансионных центрах в кристалле алмаза

Дмитриев А. К.[1], Вершовский А. К.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: alexdmk777@gmail.com

Применение методик ОДМР к отрицательно заряженным NV центрам в кристаллах алмаза позволило создать новые методы как прецизионного измерения магнитных полей с субмиллиметровым пространственным разрешением [1, 2], так и контроля электронных и ядерных спинов. Задача манипуляции последними представляет особый интерес

для квантовой обработки информации. Обычно она решается в сильных магнитных полях B, в которых происходит пересечение уровней возбужденного ($B \approx 50$ мТл) и основного ($B \approx 100$ мТл) состояния [3].

В [4], в частности, было осуществлено возбуждение многочастотного (с использованием оптической накачки, излучения сверхвысокой частоты – СВЧ и высокой частоты – ВЧ) ОДМР в сильном поле $B \approx 50$ мТл.

В данной работе была предпринята попытка возбудить многочастотный ОДМР [2] в NV центрах в слабых (порядка земного) и нулевых магнитных полях. Структура энергетических уровней NV центра в слабых полях существенно сложнее, чем в сильных; она содержит ряд пересечений и антипересечений, а зависимость энергии уровней от магнитного поля и соответствующих им частот $f_{SS'}$, $f_{II'}$ существенно нелинейна [5]. (Обозначения здесь и далее: $f_{SS'}$, $f_{II'}$ – частоты переходов с изменением проекций m_S и m_I электронного и ядерного спина соответственно; конфигурация терма при этом обозначается $|m_S, m_I>$. Если в состав NV центра входит атом ^{14}N, то $m_S = 0, \pm1$ и $m_I = 0, \pm1$).

Возбуждение многочастотного ОДМР в нашем эксперименте осуществлялось посредством введения в стандартную схему, помимо СВЧ поля f_{UHF}, дополнительного ВЧ поля f_{HF}, резонансного переходам между ядерными подуровнями одного электронного терма в магнитных полях $B = 0 \div 1$ мТл. Таким образом мы рассчитывали при одновременном выполнении условий $f_{UHF} = f_{SS'}$, $f_{HF} = f_{II'}$ воздействовать на населенности ядерных подуровней.

Однако эксперимент показал, что в спектре многочастотных резонансов доминирует резонанс, возникающий при одновременном выполнении достаточно нетривиальных условий

$$f_{HF} \approx \Delta_1,$$
$$f_{UHF} \pm \tfrac{1}{2} f_{HF} = D_{gs}, \qquad (1)$$

где $D_{gs} \approx 2.87$ ГГц – константа продольного расщепления, а $\Delta_1 = (5.6 \pm 0.2)$ МГц. Ширина резонанса равна (1.4 ± 0.2) МГц. Второй, более узкий и слабый резонанс наблюдался при

$$f_{HF} = \Delta_2,$$
$$f_{UHF} \approx D_{gs}, \qquad (2)$$

где $\Delta_2 = (3.0 \pm 0.2)$ МГц.

Детальный расчет схемы энергетических уровней для данного кристалла показал, что Δ_1 соответствует частоте перехода $|-1, \pm1> \leftrightarrow |+1, \pm1>$ при $B = 0$, а Δ_2 – частоте перехода $|1, 0> \leftrightarrow |1, \pm1>$ при $B = 0$. Таким образом, Δ_1 – это масштаб антипересечения уровней в нулевом поле.

Нами предложено объяснение наблюдавшегося эффекта, заключающееся в том, что неоднородное магнитное поле кристалла случайным образом смещает действующее на отдельный NV центр продольное локальное поле B_L на величину порядка $0 \div 0.1$ мТл; резонансы в окрестности частоты Δ_1 возникают, когда в локальном поле B_L частота СВЧ поля f_{UHF} равна частоте перехода $|0, \pm1> \leftrightarrow |+1, \pm1>$, а частота ВЧ поля f_{HF} равна частотному масштабу антипересечения уровней $|-1, \pm1> \leftrightarrow |+1, \pm1>$. В слабых полях сдвиг частот ВЧ переходов магнитным полем равен удвоенному сдвигу частот соответствующих СВЧ переходам, что и приводит к необходимости выполнения условия (1). По сходной

схеме, но с участием уровня |±1,0> образуются резонансы второго обнаруженного нами типа – в окрестности частоты Δ_2.

Мы предполагаем, что резонансное ВЧ поле выводит уровни, соответствующие суперпозиции «чистых» состояний, из взаимодействия с СВЧ полем, но конкретный механизм взаимодействия требует дальнейшего исследования.

Список литературы

1. J.M. Taylor, P. Cappellaro, L. Childress, L. Jiang, D. Budker, P.R. Hemmer, A. Yacoby, R. Walsworth, M.D. Lukin, High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution, Nature Physics, 4, 810, 2008;
2. A.K. Dmitriev, A.K. Vershovskii, Concept of a microscale vector magnetic field sensor based on nitrogen-vacancy centers in diamond, JOSA B., v.33, no.3, pp. B1-B4, 2016;
3. L. Childress, M.V. Gurudev Dutt, J.M. Taylor, A.S. Zibrov, F. Jelezko, J. Wrachtrup, P.R. Hemmer, M.D. Lukin, Coherent dynamics of coupled electron and nuclear spin qubits in diamond, Science, 314, 281, 2006;
4. L. Childress, J McIntyre, Multifrequency spin resonance in diamond, Physical Review, A 82, 033839, 2010;
5. H. Clevenson, E. H. Chen, F. Dolde, C. Teale, D. Englund, D. Braje, Diamond nitrogen vacancy electronic and nuclear spin-state anti-crossings under weak transverse magnetic fields, Physical Review, A 94, 021401, 2016.

Исследование изменения знака нелинейно-оптического отклика электрооптического кристалла ниобата лития в условиях некогерентной фоновой подсветки

Пустозеров А.В, Перин А. С. Шандаров В. М.

ТУСУР

Эл. почта: extomsk@gmail.com

При распространении световых пучков в нелинейно оптических средах возникают эффекты самовоздействия, которые позволяют реализовывать режимы пространственных оптических солитонов и создавать в среде волноводные оптические элементы [1, 2]. В настоящее время электрооптические кристаллы ниобата лития ($LiNbO_3$) привлекают повышенный интерес, поскольку за счет его фоторефрактивных свойств такие эффекты могут наблюдаться при малых интенсивностях светового поля. Введение дополнительных легирующих добавок, например, ионов железа или меди, позволяет варьировать фоторефрактивные характеристики в широких пределах, в том числе характерное время нелинейного отклика [3]. Для $LiNbO_3$ характерен нелинейный самодефокусирующий фоторефрактивный отклик, при котором показатель преломления материала уменьшается в освещенной области, что обусловлено фотовольтаическим механизмом транспорта носителей заряда. В этом случае в данном кристалле можно сформировать лишь темные

пространственные оптические солитоны [1-3]. Для изменения знака нелинейного оптического отклика и, соответственно, генерации светлых пространственных оптических солитонов в кристаллах ниобата лития, необходимо учитывать, наряду с фотовольтаическим, и другие физические механизмы транспорта носителей заряда. Так, в [4, 5] было предложено использовать спектральную зависимость величины фотовольтаического тока при освещении кристалла световыми пучками с разными длинами волн. Таким образом, целью данной работы явилось экспериментальное исследование смены знака нелинейно-оптического отклика от самодефокусирующего к самофокусирующему в условиях некогерентной фоновой подсветки, используемой совместно с фокусированным когерентным сигнальным пучком He-Ne лазера с длиной волны 633 нм в образце $LiNbO_3$:Fe.

В ходе работы исследуется влияние некогерентной подсветки на изменение необыкновенного показателя преломления кристалла с использованием метода интерференции двух лучей. В данном эксперименте, линейно поляризованное излучение He-Ne лазера с мощностью от 10 до 100 мкВт распространяется в образце $LiNbO_3$ вдоль близкого к оси Y направления. Отраженные от входной и выходной поверхностей образца пучки интерферируют, вследствие небольшой непараллельности этих поверхностей. Положение максимумов интерференционной картины определяется изменением фазы световой волны при ее двойном прохождении внутри кристалла. Пространственный сдвиг интерференционных максимумов, обусловленный некогерентной подсветкой, изучается с помощью анализатора лазерных пучков. Поляризация света He-Ne лазера соответствует необыкновенной волне. Кристаллический образец $LiNbO_3$:Fe (0.005%) имеет размеры $10\times5\times10$ мм^3 вдоль осей X, Y и Z соответственно. Некогерентное фоновое излучение вводится в образец через выходную грань кристалла. С помощью анализатора лазерных пучков в экспериментах исследуются временные зависимости сдвига максимумов интенсивности в интерференционной картине. Роль источников некогерентного излучения в экспериментах играли светодиоды с центральной длиной волны излучения 465 нм и 530 нм.

В ходе данной работы экспериментальные результаты демонстрируют возможность изменения знака нелинейно-оптического отклика когерентных узких световых пучков в кристалле $LiNbO_3$:Fe, путем создания фотовольтаического поля при помощи пространственно однородного некогерентного светового поля с меньшей длиной волны света, чем у когерентного узкого светового пучка. Это позволяет создавать новые конфигурации оптических элементов, основанных на этом кристалле, без использования методов нагрева и электронного смещения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект N 3.1110.2017/ПЧ).

Список литературы

1. Stegeman G., "Optical Spatial Solitons and Their Interactions: Universality and Diversity", Science, Vol. 286, No. 5444, 1518-1523, 1999;
2. Kip, D., “Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications”, Appl. Phys. B., Vol. 67, 131-150, 1998;

3. Шандаров В.М., "Эффект компенсации темновой проводимости LiNbO3:Fe при его легировании медью", Письма в ЖТФ., Т. 21, No. 12, 46–50, 1995;
4. Anastassiou, Ch., Shih, M., Mitchell, M., Chen, Z., Segev, M., “Optically induced photovoltaic self-defocusing-to-self-focusing transition”, Opt. Lett., Vol. 23, No. 12, 924-926, 1998;
5. She W., Xu C., Guo B., Lee W., "Formation of photovoltaic bright spatial soliton in photorefractive LiNbO3 crystal by a defocused laser beam induced by a background laser beam", Journal of the Optical Society of America B, Vol. 23, No. 10, 2121, 2006.

Оптическое индуцирование дифракционных структур в фоторефрактивном кристалле ниобата лития бесселеподобными световыми полями

Инюшов А. В.[1], Трушников И. А.[1], Перин А. С.[1]

[1]ТУСУР

Эл. почта: inyushov94@mail.ru

В настоящее время проявляется повышенный интерес к “бездифракционным” световым полям, к которым относятся пучки Эйри, Бесселя и некоторые другие [1, 2]. С помощью экспериментальных исследований ранее было подтверждено, что световые поля с бесселеподобными профилями обладают высокой продольной однородностью и концентрацией основной доли волнового поля в центральной части.

В этой работе мы исследуем формирование бесселеподобных световых пучков в фоторефрактивном кристалле ниобата лития. Геометрические размеры образца кристалла составляют 10×15×2 мм^3 по осям X,Y и Z. Толщина пластины 2 мм. В процессе выращивания кристалл был легирован медью. Поляризация излучения при индуцировании фазовой структуры соответствует обыкновенной волне в кристалле.

Идея эксперимента заключается в изучении дифракционных характеристик, полученных бесселеподобных световых пучков путем наложения амплитудных транспарантов и использовании трубчатых стеклянных волноводов.

Источником когерентного излучения является твердотельный лазер (Nd^{3+} YAG) с длиной волны 532 нм. Выходная мощность 10 мВт. Образец подвергается воздействию бесселеподобного светового пучка образованного волоконными световодами, амплитудными транспарантами и фокусирующей линзой. Пространственный период световой картины составляет 80 мкм. Чтобы исследовать картины светового поля необходимо использовать анализатор лазерного пучка. В результате воздействия мы наблюдаем формирование взаимосвязанных фотонных структур в кристалле ниобата лития.

Таким образом, наши экспериментальные результаты подтверждают возможность формирования фазовых дифракционных структур и более сложных волноводных схем, с

требуемыми профилями внутри фоточувствительных материалов, таких как фоторефрактивные кристаллы с помощью бесселеподобных световых полей.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ на 2017 – 2019 годы (проект по заявке 3.1110.2017/ПЧ).

Список литературы

1. Duocastella M., Arnold C. B., “Laser & Photonics Reviews“, Vol. 6, No. 5, 607–621, 2012;
2. Siviloglou G. A., Christodoulides D. N. “Optics Letters“, Vol. 32, No. 8, 979-981, 2007.

Экспериментальное исследование преобразования гауссовых пучков в бесселеподобные голографическими фазовыми транспарантами в фотополимерных материалах

Семкин А. О.[1], Шарангович С. Н.[1], Долгирев В. О.[1], Сон Д. И.[1]

[1]ТУСУР

Эл. почта: a.o.semkin@gmail.com

Бесселеподобные пучки лазерного излучения, в особенности оптические вихри, находят самое широкое применение в настоящее время. От прецизионных волоконно-оптических датчиков до устройств манипулирования наноразмерными объектами. Для генерации таких пучков разработано множество методов: от магнитооптической дифракции [1] и оптического клина [2] до наиболее распространенного в настоящее время метода дифракции на синтезированных компьютером голограммах [3].

В данной работе приведены результаты экспериментов по формированию и считыванию объемных фазовых голограмм в фотополимерной композиции. Особенностью сформированных голограмм является фазовый фронт сигнального пучка, преобразованный в вихревой последовательно установленными фазовым винтом и аксиконом. Ранее в [4] была разработана теоретическая модель записи таких голограмм, а в [5] рассчитаны амплитудные профили пучков, дифрагирующих на таких голограммах. В данной работе показано соответствие разработанных ранее теоретических моделей результатам экспериментов.

Таким образом, в работе экспериментально доказана возможность голографического формирования в фотополимеризующихся композициях фазовых транспарантов для преобразования световых полей в бесселеподобные.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках проектной части Госзадания (Проект № 3.1110.2017/4.6).

Список литературы

1. Грошенко Н.А., Макалиш О.С., Воляр А.В., Оптические вихри в поле рассеяния магнитных доменных голограмм, Журнал технической физики, Т.68, №12, С.54-58, 1998;
2. Шведов В.Г., Ядзебская Я.В., Алексеев А.Н., Воляр А.В., Формирование оптических вихрей в процессе дифракции света на диэлектрическом клине, Письма в ЖТФ, Т.28, №6, С. 87-94, 2002;
3. Аксенов В.П., Венедиктов В.Ю., Севрюгин А.А., Турсунов И.М., Формирование оптических вихрей с помощью голограмм с асимметричным профилем штриха, Оптика и спектроскопия, Т. 124, №2, С. 275-279, 2018;
4. Семкин А.О., Шарангович С.Н., Голографическое формирование дифракционных элементов для преобразования световых пучков в фотополимерно-жидкокристаллических композициях, Известия вузов. Физика, Т. 60, №11, С. 109-115, 2017;
5. Семкин А.О., Шарангович С.Н., Долгирев В.О., Сон Д.И., Преобразование гауссовых световых пучков в бесслеподобные голографическими дифракционными элементами в ФПМ-ЖК, управляемыми внешним электрическим полем, VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, С. 518-519, 2018.

Влияние динамической решетки инверсии населенностей активной среды на горячие моды сверхизлучающего лазера с распределенной обратной связью встречных волн

Рябинин И. С.[1], Кочаровская Е. Р.[2], Кочаровский Вл.В.[2]

[1]ВШОПФ ННГУ
[2]ИПФ РАН

Эл. почта: ivanryabinin96@gmail.com

Одно- или многомодовая квазистационарная генерация сверхизлучающих лазеров, обладающих низкодобротными комбинированными резонаторами Фабри-Перо с распределенной обратной связью волн, при небольшом превышении непрерывной накачки над порогом лазерной генерации приводит к существенно нестационарному режиму (2-ой лазерный порог) и формированию квазирегулярной или квазихаотической последовательности импульсов когерентного электромагнитного излучения, имеющих длительность меньше времён релаксации инверсии населённостей рабочих энергетических уровней активных центров и их поляризации [1-4]. Условия такого качественного изменения режима генерации и состав участвующих в нём мод лазера зависят от ряда нелинейных эффектов, в частности, от пространственной решётки (модуляции) инверсии населенностей рабочих уровней активных центров, которая создаётся встречными волнами квазистационарных лазерных мод и может оказывать на них значительное влияние, перерассеивая встречные волны, меняя инкременты и частоты «горячих» мод, вводя в

генерацию новые моды, изменяя их нелинейное взаимодействие и порождая дополнительные гармоники поля и поляризации активной среды.

Для изучения указанных явлений проведена линеаризация одномерных интегро-дифференциальных уравнения Максвелла-Блоха для сверхизлучающего лазера с небольшим неоднородным уширением спектральной линии 2-уровневой активной среды в предположении фиксированных (постоянных вдоль резонатора) уровня инверсии и комплексной амплитуды динамической решётки инверсии и проанализированы вносимые ими изменения в спектры и инкременты «горячих» мод, отличных от исходных «холодных» мод комбинированного резонатора Фабри–Перо с распределённой обратной связью волн, заданной комплексной амплитудой гармонической модуляции диэлектрической проницаемости матрицы активной среды с волновым числом, равным волновому числу электромагнитной волны на частоте рабочего перехода лазера при нулевой инверсии.

Исследовались как характеристическое уравнение, следующее из граничных условий на торцах (полупрозрачных зеркалах) активного образца, так и дисперсионное уравнение непрерывного спектра волн в активной среде с учётом брэгговской решётки β и решётки инверсии n_z, обладающих различными фазами:

$$\gamma_+\gamma_- + \kappa^2 - \left(\Omega + \frac{n_p}{\Omega + i\left(\Delta_0 + \Gamma_2\right)} \right)^2 = 0,$$

$$\gamma_\pm = \left|\beta\right| e^{\pm i\psi} \pm \frac{1}{2i} \frac{\left|n_z\right| e^{\pm i\phi}}{\Omega + i\left(\Delta_0 + \Gamma_2\right)}.$$

Здесь n_p — уровень инверсии, задаваемый некогерентной накачкой, Γ_2 и Δ_0 — величины соответственно однородного и неоднородного уширения спектральной линии, нормированные на так называемую кооперативную частоту активных центров [1, 2], κ и Ω — так же нормированные отстройки волнового числа и частоты «горячей» моды от брэгговского волнового числа комбинированного резонатора и несущей частоты поля, равной рабочей частоте лазерного перехода.

В результате исследования решений указанных уравнений определены условия, при которых динамическая решётка инверсии активной среды существенно влияет на 2-ой лазерный порог и спектральные характеристики неустойчивых «горячих» мод, а также найдены вызванные этой решёткой изменения частот и инкрементов таких мод и характерная пространственная структура их поля для ряда типичных параметров сверхизлучающего лазера. Показано, что «холодные» электромагнитные моды лазерного резонатора, существующие при нулевой инверсии активной среды, благодаря инверсии и динамической решётке превращаются в «горячие» поляритонные моды, которые по дисперсионным свойствам существенно отличаются от традиционных поляритонов в неинвертированной среде.

Список литературы

1. Kocharovsky Vl.V., Belyanin A.A., Kocharovskaya E.R., Kocharovsky V.V, Superradiant Lasing and Collective Dynamics of Active Centers with Polarization Lifetime Exceeding Photon Lifetime, Advanced Lasers: Laser Physics and Technology for Applied and Fundamental Science Series: Springer Series in Optical Sciences. V. 193, P. 49–69. 2015;
2. Кочаровский Вл.В., Железняков В.В., Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В, Сверхизлучение: принципы генерации и реализация в лазерах, УФН. Т. 187, вып. 4, С. 367–410, 2017;
3. Vukovic N., Radovanovic J., Milanovic V., Boiko D.L, Analytical expression for Risken-Nummedal-Graham-Haken instability threshold in quantum cascade lasers, Opt. Express. V. 24, P. 26911–26929. 2016;
4. Kogelnik H., Shank C.V, Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers, J. Appl. Phys. V. 43, P. 2327-2335. 1972.

Исследование пространственной модуляции параметров канальных волноводных структур, оптически индуцированных в кристалле ниобата лития с фоторефрактивной поверхностью

Безпалый А. Д.[1], Перин А. С.[1], Шандаров В. М.[1]

[1]ТУСУР

Эл. почта: id_alex@list.ru

Развитие квантовых и интегрально-оптических технологий напрямую зависит от изучения областей физики и техники, таких как волноводная фотоника и нелинейная оптика [1-3]. Исследование влияния лазерного излучения на свойства материала и взаимодействия с ним представляет фундаментальную и практическую значимость для данных областей. Одним из таких материалов является кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$). Благодаря уникальному набору физических и нелинейно-оптических свойств кристаллы $LiNbO_3$ широко применяются на практике в качестве сред, позволяющих управлять характеристиками распространяющихся в них световых полей. Одним из таких свойств $LiNbO_3$ является фоторефрактивный нелинейный отклик, способный изменять показатель преломления среды под действием оптического излучения [4-5]. Таким образом, появляется возможность оптического индуцирования элементов трансформации и управления световыми потоками. В качестве таких элементов могут выступать дифракционные решетки или системы связанных канальных оптических волноводов, топология которых определяется схемой и методикой их формирования [6-7].

Целью данной работы является исследование влияния пространственной модуляции параметров канальных волноводных структур на характеристики оптической связи между такими структурами при их оптическом индуцировании в образцах ниобата лития, поверхностно легированных ионами меди, железа и их комбинациями.

Канальные оптические волноводы формировались путем поточечного экспонирования поверхности кристалла $LiNbO_3$ Y-среза с размерами 30×3×15 мм^3 по осям X×Y×Z при смещении образца относительно светового пучка. Источниками излучения являлись твердотельный YAG:Nd^{3+} лазер с длиной волны λ = 532 нм и полупроводниковый лазер с λ = 450 нм. Оптическая нелинейность кристалла $LiNbO_3$ носит самодефокусирующий характер, и проявление фоторефрактивного эффекта приводит к уменьшению показателя преломления среды в экспонированной области, поэтому волноводно-оптический эффект может проявляться в промежутке между двумя поточечно экспонированными областями. В экспериментах такие области представляли собой параллельные полоски. Каждая полоска индуцировалась фокусированным световым пучком и состояла из перекрывающихся между собой точек, центры которых для различных случаев варьировались в пределах от 20 до 60 мкм. Расстояние между полосками также изменялось от нескольких единиц до десятков микрометров в зависимости от условий эксперимента. Время экспонирования каждой точки в разных экспериментах составляло от 3 до 12 секунд при изменении мощности индуцирующего излучения от 1 до 10 мВт. Диаметр светового пучка по уровню половинной интенсивности составлял около 15 мкм. Смещение образца относительно светового пучка осуществлялось с помощью линейного позиционера, обеспечивающего точность перемещения в 5 мкм.

Индуцированные в легированной поверхностной области $LiNbO_3$ неоднородности зондировались при помощи He-Ne лазера с длиной волны излучения λ = 633 нм. Результаты зондирования показали, что изменение шага экспонирования влияет на однородность структур в продольном и поперечном направлениях, а также позволяет задавать топологию формируемой структуры в процессе поточечного индуцирования. В зависимости от изменения продольной однородности границ одного из канальных волноводов, можно усиливать либо ослаблять связь между ними. Так, при формировании двух продольно однородных волноводов с одинаковыми параметрами, появляется возможность обеспечить их наибольшей связью. В случае индуцирования одного из них с неоднородностью в продольном направлении, переход излучения из соседнего осуществляется значительно хуже.

Таким образом, экспериментально продемонстрировано формирование канальных волноводных структур с пространственной неоднородностью их параметров. Показано, что варьирование параметров однородности формируемых структур позволяет управлять характеристиками межканальной оптической связи между канальными волноводами, оптически индуцированными путем поточечного экспонирования фоторефрактивной поверхности кристалла ниобата лития.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ на 2017 – 2019 годы (проект по заявке 3.1110.2017/ПЧ).

Список литературы

1. Yamada H., Chu T., Ishida S. and Arakawa Y., Si Photonic Wire Waveguide Devices. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 12, P. 1371–1379, 2006;

2. Rabus D.G., Bian Z. and Shakouri A.Ring Resonator Lasers using Passive Waveguides and Integrated Semiconductor Optical Amplifiers. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 13, P. 1249–1256, 2007;
3. Bazzan M. and Sada C., Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications, Applied Physic Reviews, Vol. 2, P. 040603-1 – 040603-25, 2015;
4. Peithmann K., Hukriede J., Buse K. and Kraetzig E., Photorefractive properties of $LiNbO_3$ crystals doped by copper diffusion, Phys. Rev. B., Vol. 61, P. 4615–4620, 2000;
5. Imbrock J., Wirp A., Kip D., Kraetzig E. and Dirk B., Photorefractive properties of lithium and copper in-diffused lithium niobate crystals, J.Opt. Soc. Am. B., Vol. 19, P. 1822–1829, 2002;
6. Perin A.S., Shandarov V.M. and Ryabchenok V.Yu., Photonic Waveguide Structures in Photorefractive Lithium Niobate with Pyroelectric Mechanism of Nonlinear Response, Phys. of Wave Phenom., Vol. 24, P. 7-10, 2016;
7. Vittadello L., Zaltron A., Argiolas N., Bazzan M., Rossetto N. and Signorini R., Photorefractive direct laser writing, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 49, No. 12 (125103), P. 1-9, 2016.

Оптическое отражение и люминесцентное рециклирование в солнечном элементе с 1D фотонной структурой

Минтаиров М. А.[1], Левина С. А.[1], Емельянов В. М.[1], Филимонов Е. Д.[1], Шварц М. З.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: levina@mail.ioffe.ru

Определение фотоэлектрических характеристик многопереходных солнечных элементов (МП СЭ) является сложной экспериментальной задачей, которой в последние годы уделяется повышенное внимание [1]. Нередко при исследовании спектральных зависимостей внешней квантовой эффективности МП СЭ регистрируемый фотоотклик одного из исследуемых *p-n* переходов оказывается сильно заниженным. Одновременно с этим проявляется другая особенность подобных исследований – наблюдение артефактной чувствительности узкозонных субэлементов за пределами основного спектрального диапазона фоточувствительности. Среди широко обсуждаемых причин, влияющих на результаты исследований, выделяются следующие: люминесцентная связь [2], низкое шунтирующее сопротивление и низкое напряжение обратного пробоя [3]. Однако, для МП СЭ со встроенными 1D фотонными кристаллами (брэгговскими зеркалами — БЗ) экспериментальные зависимости не всегда удается интерпретировать, опираясь исключительно на особенности оптического взаимодействия и электрические параметры *p-n* переходов. Будучи оптически настроенным на отражение излучения вблизи области длинноволнового края фоточувствительности субэлемента, а соответственно и рекомбинационного (люминесцентного) излучения, БЗ инициирует процесс рециклирования последнего внутри GaInP-GaAs-Ge структуры.

В зависимости от проектных параметров 1D фотонная структура, расположенная между GaAs и Ge субэлементами, может оказаться, с одной стороны, частично прозрачной для внешнего и люминесцентного (вторичного) излучений, направляемых из GaAs в Ge субэлемент, а с другой практически полностью «блокировать» излучение в заданном диапазоне длин волн, увеличивая поток рециклируюшего в слоях GaAs субэлемента излучения. Некорректный выбор исходных параметров полупроводниковой и фотонной структур в МП СЭ, равно как и нарушение технологии роста, может приводить к сдвигу спектрального диапазона оптической запрещенной зоны БЗ, меняя долю люминесцентного излучения, проходящего в Ge субэлемент, в общем потоке рекомбинационного излучения.

В данной работе для структур со встроенными БЗ рассматриваются варианты возможного «запирания» вторичного рекомбинационного излучения в слоях GaAs субэлемента и запуска механизмов его рециклирования. Основным экспериментальным инструментом, обеспечивающим сдвиг длины волны рекомбинационного излучения, равно как и зоны оптического отражения БЗ, является температура образца, варьируемая в диапазоне от 80 К до 400 К. Для теоретических оценок используются известные из литературы температурные коэффициенты ширины запрещенной зоны, показателей поглощения, преломления и т.д. [4].

Проходящий в узкозонный Ge субэлемент люминесцентный поток инициирует добавочный фототок в Ge, формируя оптическую связь. Следовательно, следует ожидать реакцию так называемого «артефактного фотоотклика» на изменение оптических свойств БЗ, фотоэлектрических характеристик p-n переходов и рекомбинационных параметров фотоактивных слоев. Спектры люминесценции GaAs и отражения БЗ поразному реагируют на изменение температуры. Оценки показали, что скорость сдвига длинноволнового края поглощения GaAs субэлемента составляет 0.4 нм/^{o}К, в то время как область оптической запрещенной зоны AlGaAs/GaAs 1D структуры имеет температурный коэффициент дрейфа 0.08 нм/^{o}К.

Температурные исследования спектральных зависимостей фоточувствительности, коэффициента отражения для БЗ и электролюминесценции показали, что за счет изменения температуры можно «согласовывать» диапазон эффективного отражения БЗ с длиной волны люминесцентного излучения, практически полностью «блокируя» его в пределах слоев GaAs субэлемента. При этом наблюдается резкое снижение эффективности оптического взаимодействия и соответствующее этому состоянию увеличение регистрируемых значений внешнего квантового выхода для Ge субэлемента с одновременным уменьшением артефактного фотоотклика в области коротких длин волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 18-32-00561).

Список литературы

1. E. Barrigon, P. Espinet-Gonzalez, Y. Contreras, and I. Rey-Stolle, Implications of low breakdown voltage of component subcells on external quantum efficiency measurements of multijunction solar cells, Prog. Photovolt. Res. Appl. 23(11), 1597–1607, 2015;

2. M. A. Steiner, J. F. Geisz, T. E. Moriarty, R. M. France, W. E. McMahon, J. M. Olson, S. R. Kurtz, and D. J. Friedman, Measuring IV curves and subcell photocurrents in the presence of luminescent coupling, IEEE J. Photovolt. 3(2), 879–887, 2013;
3. J. P. Babaro, K. G. West, and B. H. Hamadani, Spectral response measurements of multijunction solar cells with low shunt resistance and breakdown voltages, Energy Sci Eng 4(6), 372–382, 2016;
4. http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond.

Спектроскопия возбуждения фотолюминесценции массивов квантовых точек InGaAs/GaAs в широком диапазоне температур

Рыбалко Д. А.[1], Надточий А. М.[1], Максимов М. В.[1]

[1]СПбАУ РАН

Эл. почта: dimarybalko91@gmail.com

Полупроводниковые структуры с квантовыми точками (КТ) In(Ga)As/GaAs являются одним из перспективных материалов современной фото- и наноэлектроники. На их основе создается широкий ряд устройств, в частности: лазеры, светодиоды, фотоприемники, а также солнечные элементы. При разработке приборов важно знать и управлять энергетической структурой квантовых точек, а также понимать особенности процессов транспорта и релаксации носителей заряда.

Одним из наиболее информативных экспериментальных методов исследования массивов КТ является метод спектроскопии возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ). С его помощью можно не только выявить структуру и плотность возбужденных энергетических состояний, но и, благодаря возможностям селекции КТ из массива, проследить транспорт носителей заряда между КТ и другими уровнями.

Одной из трудностей при применении метода ВФЛ является спектральное наложение пиков LO-фононов и энергетических уровней в исследуемой среде. Однозначно отличить друг от друга эти два типа пиков позволяет детальный анализ эволюции спектров ВФЛ при сканировании энергией детектирования по фронту пика фотолюминесценции основного состояния КТ. Для структур с массивом квантовых точек, обладающих значительным разбросом по размеру, возможно получение спектров ВФЛ от небольших групп точек сходного размера. Поэтому исследование массивов КТ методом ВФЛ, как правило, представляет интерес при низких температурах, когда подавлен выброс и, следовательно, транспорт носителей заряда между КТ.

При высоких температурах (более 200 К) активируются механизмы транспорта носителей заряда между точками и возможность селекции по размеру пропадает. Изменения спектров ВФЛ при увеличении температуры рассмотрены, например, в работе [1]. Однако, показаны лишь одиночные спектры, а влияние увеличения температуры сведено только к исчезновению спектральных особенностей в спектрах ВФЛ.

В данной работе впервые детально исследованы массивы КТ методом спектроскопии ВФЛ в широком диапазоне температур. Рассмотрены структуры с различным числом слоев КТ, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Обнаружено, что при температурах 140-160 К в структурах с КТ наблюдаются качественные изменения в эволюции спектров ВФЛ при сканировании по энергии детектирования. Так, обнаружено, что при повышении температуры выше 160 К зависимость от энергии детектирования разницы между энергией пика возбужденного состояния и энергии детектирования на основном состоянии меняет наклон. Это означает искажение селекции КТ по размерам при исследовании методом ВФЛ. Т. е. фотогенерированные носители заряда с возбужденных состояний КТ одного характерного размера после релаксации с большей вероятностью окажутся в КТ другого характерного размера.

Наблюдаемые эффекты мы связываем с переходом при температурах 140-160 К заполнения массива КТ от неравновесного (случайного) типа к равновесному. В первом случае в следствие отсутствия транспорта носителей заряда между КТ реализуется случайное заполнение массива фотогенерированными носителями заряда вне зависимости от размера КТ. Во втором случае термически обусловленный выброс носителей заряда из КТ и перезахват другими КТ приводит к реализации заполнения неоднородного массива в соответствии с распределением Ферми-Дирака. Данное предположение подтверждается корреляцией у различных структур температуры аномального поведения в данных ВФЛ и температуры минимума ширины спектра фотолюминесценции, являющейся индикатором перехода между равновесным и неравновесным заполнением массива КТ.

Таким образом, обнаружено, что в некотором диапазоне температур, связанного со сменой типа заполнения носителями заряда массива КТ с неравновесного на равновесный, наблюдается искажение селекции КТ по размерам при исследовании методом ВФЛ.

Данные исследования могут представлять интерес как для фундаментальных исследований КТ, так и для реализации приборов на их основе.

Список литературы

1. 1. Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, С.А. Блохин и др., Неравновесный характер распределения носителей при комнатной температуре в квантовых точках InAs, покрытых тонкими слоями AlAs/InAlAs, ФТП 32 (10), стр. 1230-1235, 2005.

Применение лидарных методов в интересах промысловой океанографии

Горяинов В. С.[1], Бузников А. А.[1], Черноок В. И.[2]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
[2]Гипрорыбфлот

Эл. почта: vsgoriainov@etu.ru

Растущая антропогенная нагрузка на ресурсы Мирового океана увеличивает значимость методов, в том числе дистанционных, для быстрой и точной оценки их состояния. Концепция промысловой океанографии объединяет методы различных отраслей океанографии в интересах промыслового рыболовства.

Лидарный метод основан на зондировании водной среды короткими лазерными импульсами и регистрации излучения, рассеянного в направлении приемника. Поскольку чистая вода прозрачна в видимой области спектра, а многие компоненты природных вод, определяющие их биологическую продуктивность (растворенные органические вещества, фитопланктон) оптически активны, то спектральный и поляризационный состав лидарного эхо-сигнала позволяет оценивать продуктивность природных вод.

Большой интерес представляет универсальная лидарная система, позволяющая определять несколько гидрооптических характеристик водной среды: показатель диффузного ослабления K_d, общий показатель ослабления, интенсивность флуоресценции фитопланктона, РОВ и комбинационного рассеяния водой. Эти задачи были решены созданием судового лидара "Гидробионт", конструкция которого объединяет импульсный лазер с длиной зондирующего излучения 532 нм, 2 приемных канала, работающих на исходной длине волны с ортогональной поляризацией, и 3 спектральных канала с рабочими длинами волн 685, 651 и 610 нм [1].

Для оценки прозрачности водной среды применяется аппроксимация убывающей части эхо-сигнала экспоненциальной функцией вида

$$P^{ap}(t) = A\frac{\exp(-\Gamma_{ap}ct)^2}{2nh+ct},$$

где c — скорость света в вакууме, h — высота лидара над водой, A = const, n — показатель преломления света водой. При этом до глубин порядка десятков метров считается верным равенство $\Gamma_{ap} \approx K_d$.

Для сокращения трудоемкости такой аппроксимации в качестве базового сигнала авторами предложена другая функция — асимметричная гауссова кривая [2]:

$$P^{ap} = \begin{cases} a\exp\left[-(t-b)^2/c\right], t < b \\ a\exp\left[-(t-b)^2/cd\right], t \geq b \end{cases}$$

где коэффициент $d > 1$ характеризует скорость затухания сигнала по сравнению со скоростью его нарастания. Согласно результатам численных экспериментов, аппрокси-

мация асимметричной гауссовой кривой сокращает время обработки отдельного эхосигнала приблизительно в 1,5 раза.

Список литературы

1. Горяинов В. С., Бузников А. А., Черноок В. И. Морские испытания судового лидара "Гидробионт". 67-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ "ЛЭТИ": тезисы докладов. С. 75-78. 2014;
2. Горяинов В. С., Бузников А. А., Черноок В. И. Модификация метода базового сигнала. Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". №8. С. 63-67. 2017.

Optics of low-dimensional plasmon-excitons in metal-semiconductor nanostructures

Korotchenkov A. V.[1], Kosobukin V. A.[1]

[1]Ioffe Institute

Эл. почта: KorotchenkovAlex@gmail.com

Nanooptics of local (surface) plasmons and low-dimensional excitons is of growing interest from the viewpoints of both fundamental science and applications. In the visible, the collective electronic excitations of the two types can interact with each other making up mixed plasmon-exciton (PE) modes, observable spectroscopically [1].

In this work, a theory is developed for coupled quasi-2D excitons and local plasmons in nanostructures with neighboring quantum wells (QWs) and metal nanoparticles (NPs). The Coulomb interaction between dipole plasmons of a NP layer and their images due to the quasi-2D exciton polarization of neighboring QW is considered. Mixed PE modes caused by resonant near field interaction are treated successively in the following principal arrangements: i) a single NP located near a QW, cf. [2]; ii) a regular layer of NPs near a QW [3]; iii) a superlattice of the cells QW+NP-layer stacked along their common normal [4]. For each of the arrangements i-iii, the effective PE polarizability is calculated self-consistently within the Green's function technique in resonant multiple-scattering from a layer of spheroidal NPs near a QW. The related PE spectra are investigated for models with either a single NP or a layer of NPs occupying a square lattice near a QW, the plasmons in a layer of metal NPs being treated in accordance with [5]. The observable spectral quantities are explicitly calculated for Ag NPs near AlGaAs/GaAs QW and preliminarily estimated for Al disks near QW ZnO, like in experiment [1]. At the PE resonance the mixed-mode spectrum demonstrates a considerable exciton-conditioned narrow dip which vanishes in non-resonant PE spectra.

The feature in PE spectra predicted for models i-iii is associated with the pronounced Rabi splitting of mixed PE modes at the PE resonance. To give more detail, the spectroscopic manifestations of the hybrid PE modes in arrangements i-iii are the following.

i) For a single nanoparticle near a QW, the PE splitting appears in the lineshapes of cross-sections for resonant elastic scattering of light depending on scattering polarization channels $\lambda \to \lambda'$. The linear polarizations of incident λ and scattered λ' light waves are either *s* or *p*, the scattered waves with changed azimuth angle becoming circularly polarized.

ii) For a short-period layer of NPs located near a QW, the PE modes provide resonant specular reflection. The reflectivity peak *R* manifests PE splitting similar to that in the spectra of PE polarizability.

iii) In a periodical superlattice of cells QW+NP-layer, PE polaritons propagate along the normal to cells. Resonant one-dimensional Bragg diffraction of PE polaritons occurs in a superlattices whose period is comparable with the wavelength of light. The PE reflectivity spectra R_N are calculated for superlattices with different numbers *N* of cells QW+NP-layer. The resonant spectrum R_N typical of plasmonic (without QWs) superlattice splits into two peaks at the PE resonance. The related narrow spectral dip has considerable depth at small numbers *N* and decreases in increasing *N*. For PE in superlattices, it is concluded that the transition from superradiance regime (R_N increases with *N*) to total reflection ($R_N \approx 1$) occurs at rather small numbers *N* in contrast to excitonic superlattices.

To summarize, coupling between the nanoparticle plasmons and quantum-well excitons is shown to result in considerable splitting of the PE spectra of elastic scattering and reflection of light. The related two spectral peaks are separated by a narrow dip whose depth can be comparable with the plasmon-polariton peak itself.

Список литературы

1. B.J. Lawrie, K.-W. Kim, D.P. Norton, R.F. Haglund Jr., Nano Lett. **12**, 6152 (2012);
2. V.A. Kosobukin, Phys. Solid State **57**, 1439 (2015);
3. V.A. Kosobukin, Solid State Communications **228**, 43 (2016);
4. V.A. Kosobukin, Phys. Solid State **59**, 999 (2017);
5. V.A. Kosobukin, A.V. Korotchenkov, Phys. Solid State **58,** 2536 (2016).

Моделирование формирования оптических вихрей серебряными спиральными зонными пластинками

Козлова Е. С.[1], Котляр В. В.[1]

[1]ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Эл. почта: kozlova.elena.s@gmail.com

Большое количество современных работ посвящено исследованию спиральных зонных пластинок, которые позволяют формировать и фокусировать оптические вихри [1-6]. В [1] теоретически и экспериментально рассматривается элемент, представляющий комбинацию спиральной зонной пластинки (СЗП) и ЗП Габора, который позволяет формировать однофокусный спиральный пучок. В [2] продемонстрирован ДОЭ, способный генерировать ультраплотный оптический вихрь произвольной фокус-глубины от плос-

кой волны. В [3] продемонстрирована возможность формирования спиральных пучков и оптических вихрей с управляемым топологическим зарядом. В [4] с помощью сдвига фазы СЗП показана возможность управления размером генерируемого вихря, форма которого сохраняется в длительной фокальной глубине, а фаза вращается вокруг оси распространения.

В данной работе с помощью FDTD-метода проведено моделирование формирования и фокусировки оптических вихрей в процессе распространения лазерного излучения с круговой поляризацией и длиной волны 633 нм через амплитудные СЗП, выполненные из серебра на подложке из кварцевого. Диэлектрические проницаемости для кварцевого стекла и серебра описывались с помощью модели Селлмейера и Друде-Лоренца соответственно. В работе рассматривались СЗП с топологическим зарядом один и два, при этом толщина пленки варьировалась от 50 до 300 нм, с шагом в 10 нм. В ходе исследования было показано, что толщина серебряной пленки в 70 нм является наиболее оптимальной в рассматриваемом диапазоне. Так СПЗ с топологическим зарядом равным единице и высотой рельефа 70 нм позволяет фокусировать излучение на расстоянии 2 мкм от поверхности рельефа в пятно с шириной и глубиной фокуса по полуспаду интенсивности 0,75 и 1.13 от длины волны соответственно. СПЗ с топологическим зарядом равным двойке и аналогичной высотой рельефа позволяет фокусировать излучение на том же расстоянии от поверхности рельефа в пятно с шириной и глубиной фокуса по полуспаду интенсивности 0,7 и 1.13 от длины волны соответственно. При этом интенсивность в фокусе превышает значение падающей интенсивности в 8 раз для СЗП с топологическим зарядом единица, что всего в 3,5 раза меньше чем для аналогичной СЗП, выполненной из кварцевого стекла. При этом пространственные характеристики фокуса совпадают. В [7] в частности продемонстрировано, что изготовление амплитудных аналогов фазовых ЗП является более простой задачей, что является неомненны преимуществом рассматриваемых амплитудных СПЗ.

Список литературы

1. Liang Y., Wang E., Hua Y., Xie C., and Ye T., Single-focus spiral zone plates, Opt. Letters, 42(13), 2663-2666, 2017;
2. Zheng C., Zang H., Du Y., Tian Y., Ji Z., Zhang J., Fan Q., Wang C., Cao L., Liang E., Realization of arbitrarily long focus-depth optical vortices with spiral area-varying zone plates, Optics Communications, 414, 128–133, 2018;
3. Rafighdoost J. and Sabatyan A., Spirally phase-shifted zone plate for generating and manipulating multiple spiral beams, J. Opt. Soc. Am. B, 34(3), 608-612, 2017;
4. Sabatyan A. and Behjat Z., Radial phase modulated spiral zone plate for generation and manipulation of optical perfect vortex, Opt. Quant. Electron., 49, 371, 2017;
5. Liu H., Mehmood M.Q., Huang K., Ke L., Ye H., Genevet P., Zhang M., Danner A., Yeo S.P., Qiu C.-W., and Teng J., Twisted Focusing of Optical Vortices with Broadband Flat Spiral Zone Plates, Adv. Optical Mater., 2, 1193–1198, 2014;
6. Wei L., Gao Y., Wen X., Zhao Z., Cao L., and Gu Y., Fractional spiral zone plates, J. Opt. Soc. Am. A, 30(2), 233-237, 2013;

7. Kotlyar V.V. Stafeev S.S. Nalimov A.G. Kotlyar M.V. O'Faolain L. Kozlova E.S., Tight focusing of laser light using a chromium Fresnel zone plate, Opt. Express, 25(17), 19662-19671, 2017.

Изучение особенностей изменения фотолюминесценции листьев растения при их температурной обработке

Мороз А. В.[1], Рудь В. Ю.[1,2,3]

[1]СПбПУ
[2]ВНИИФ
[3]ФТИ

Эл. почта: moroz.com3844@gmail.com

Изучение физических и других свойств живых систем всегда актуально для решения множества практических и теоретических задач при развитии биологических и сельскохозяйственных наук и решения проблем национальной продовольственной безопасности. В этой связи возрастает необходимость использования в исследованиях хорошо зарекомендовавших себя при решении других научных задач методов и экспериментальных методик.

Благодаря применению таких методов было установлено, что при возбуждении зеленых листьев оптическим излучением с энергией квантов света 1,96 эВ возникает интенсивная красная фотолюминесценция, состоящая из двух перекрывающихся полос [1]. Это привело к расширению применения методов исследования различных характеристик оптических свойств растений, в которых зеленые растительные объекты исследовались бы как обычные твердотельные полупроводниковые образцы. При этом анализ результатов проводится исходя из установленных для твердотельных объектов представлений и получить новую информацию об растительных объектах. Именно поэтому применение хорошо развитой в применении к физике твердого тела методики исследования фотолюминесценции [2, 3] для изучения живых зеленых растений видится нам целиком инновационным и перспективно востребованным [3, 4]. Представленная работа демонстрирует результаты изучения излучательных свойств листьев в случае их нагрева выше T=300K когда начинаются процессы затухания жизни в растении. Работа фактически является логическим развитием наших исследований [1-4]. Это позволяет установить новые аспекты затухания биологических процессов в зеленых листьях.

Исследование фотолюминесценции было проведено на зеленых листьях различных растений сразу после их отделения от растения. Нагрев образцов происходил при помощи нагревательной обмотки, а на котором осуществлялось изменение температуры образца. Непосредственно температура измерялась методом медь-константановой термопары. Источником возбуждения фотолюминесценции в эксперименте было излучение гелий-неонового лазера с мощностью 10 мВт. Излучение фотолюминесценции далее поступало на монохроматор МДР-3 с решеткой 600 штрихов /мм и детектировалось фо-

тоэлектронным умножителем. Спектральное разрешение экспериментальной установки было не хуже 1 мэВ.

Эксперимент обнаружил, что спектральный контур фотолюминесценции включает в себя две полосы с максимумами при энергиях 1.67 эВ и 1.80 эВ при T=300 K. Интенсивности при максимумах этих перекрывающихся полос люминесценции соотносятся как 0.37, что свидетельствует о доминировании длинноволновой компоненты спектра. В процессе повышения температуры эксперимент показал, что происходит изменение контура фотолюминесценции. При этом начинает все более и более доминировать коротковолновая составляющая спектра. Важно отметить что при температурах выше 440 К коротковолновая составляющая спектра начинает уже доминировать. Длинноволновая полоса при комнатной температуре отмечается как более широкая, чем коротковолновая. Однако с возрастанием температуры наблюдается уширение обеих полос фотолюминесценции, и при этом обнаруживается сближение энергетических максимумов длинноволновой и коротковолновой полос ввиду повышения энергии длинноволнового максимума и, соответственно, падения энергии коротковолнового максимума фотолюминесценции. Как основной результат, полученный при высокотемпературной обработке зеленых листьев в диапазоне от 300 К до 440 К следует отметить, что повышение вызывает наступление необратимых переходов, однако не приводит к затуханию интенсивной красной фотолюминесценции, характерной для зеленых листьев. Особо следует отметить высокую термическую стабильность люминесцентных свойств этих материалов, эти результаты могут быть интересны не только для биологии и сельского хозяйства, но и для новых приложений фотоники.

Список литературы

1. Кудряшова И. С., Ляпищев В. А., Глинушкин А. П., Рудь В. Ю., Рудь Ю. В., Шпунт В. Х. Особенности люминесцентной спектроскопии при изучении зеленых листьев растений Международная молодежная конференция Physica SPb. Сборник тезисов, Санкт-Петербург, с. 44-45, 2016;
2. Вилли К., Детье В. Биология. М. 1975. С.87;
3. Глинушкин А.П., Рудь Ю.В., Рудь В.Ю., Шпунт В.Х., Кудряшова И.С., Можайко А.А. Применение апробированных физических твердотельных экспериментальных методик для изучения растений, Биотика, т. 6, вып. 7, стр. 29-33, 2015;
4. Kudryashova I.S., Rud V.Yu., Shpunt V.Ch., Rud Yu.V., Glinushkin A.P. Red photoluminescence of living systems at the room temperature : measurements and results. Journal of Physics: Conference Series volume 741 (2016) 012106– proceeding the 3st International School and Conference «Saint – Petersburg OPEN 2016» on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (28–30 March 2016, St Petersburg, Russia), 2016.

Особенности поляризационной фоточувствительности в структурах на основе CdTe

Жариков И. А.[1], Рудь В. Ю.[2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ

Эл. почта: zharikov.igor2015@yandex.ru

Материалы на основе полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$, к которым принадлежит CdTe, относятся к соединениям, интерес к которым не уменьшается уже несколько десятков лет. Эффективность фотопреобразования устройств на их основе уже доведена до 15%, тогда как теоретическая оценка этого параметра значительно выше и достигает 25% [1–6]. По этой причине число работ по созданию новых технологий и изучению фотоэлектрических процессов в различных типах фоточувствительных структур из CdTe интенсивно разрастается. В частности, до сих пор остается актуальным поиск новых методов создания поверхностно-барьерных структур. К ним, в первую очередь, следует отнести методы создания фотодиодных структур посредством лазерной перекристаллизации с целью изменения типа проводимости приповерхностного слоя. Важным также остается вопрос создания омических контактов к вышеперечисленным структурам, которые характеризуются малым шумом, имеют линейные, стабильные во времени вольтамперные характеристики. Данная работа принадлежит этому актуальному направлению и посвящена исследованиям поляризационной фоточувствительности в нескольких созданных различными технологическими методами (метод газотранспортных реакций с использованием транспортирующих агентов NH_4Cl (Br,J) и метод направленной кристаллизации из расплава, близкого к стехиометрии CdTe, при контролируемом парциальном давлении паров) фоточувствительных структур на основе CdTe. Для изучения поляризационных свойств полученных структур был применен широко известный метод поляризационной фотоэлектрической спектроскопии [2, 4], основу которого составляют измерения поляризационных индикатрис фототока в зависимости от длины волны падающего излучения. Измерения проводятся во всей области фоточувствительности полупроводника в зависимости от геометрии освещения. Далее из известных соотношений вычисляется коэффициент фотоплеохроизма. В условиях освещения полученных фоточувствительных структур на основе CdTe линейно поляризованным излучением (ЛПИ) вдоль нормали как к поверхности CdTe, так и к приемной плоскости таких структур, фототок короткого замыкания i не обнаружил какой-либо зависимости от пространственной ориентации вектора электрического поля E световой волны. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что фотоактивное поглощение в обоих компонентах полученных структур изотропно, и поэтому коэффициент естественного фотоплеохроизма 0 [4]. Поэтому были проведены исследования наведенного фотоплеохроизма при наклонном падении линейно-поляризованного излучения. Было обнаружено, что как только угол падения становится отличным от нуля градусов, появляются поляризационные зависимости фототока для разных поляризаций в зависимости от угла падения. Эти закономер-

ности находятся в соответствии с анализом оптических процессов на основании формул Френеля [2, 7] при наклонном падении ЛПИ на границу приемной плоскости структуры на CdTe. Типичные спектральные зависимости демонстрируют, что при постоянном угле падения наведенный фотоплеохроизм для исследованных структур показывает постоянство во всей области фоточувствительности. Таким образом можно сделать вывод, что подобные структуры на CdTe могут найти применение в фотонике в качестве высокочувствительных широкодиапазонных фотоанализаторов линейно-поляризованного излучения, с экспрессной перестройкой от поляризационно- нечувствительного (угол падения = 0◦), к поляриметрическому режиму регистрации (угол падения > 0◦).

Список литературы

1. Г.С. Ландсберг. Оптика (М., Высш. шк., 1976);
2. F. Kydd, F. J. Bryant The photosensitivity of cadmium telluride. Phys.Stat. Sol. Vol. 1974.23, 1, pp. K49–K54;
3. Рудь Ю.В. Фотоплеохроизм и физические принципы создания полупроводниковых фотодетекторов // Изв. вузов СССР. Физика. Т. XXIX. 1986.No 8. С. 68-83;
4. Рудь В.Ю. Фотоплеохроизм алмазоподобных полупроводников и поляриметрические структуры на их основе. //Дис. д. ф.-м. н. Ульяновск: УлГУ, 2005;
5. V. Babentsov, J. Franc, R.B. James. IEEE Transactions on Nuclear Science (2009) 56(4):1724 – 1730. DOI 10.1109/TNS.2009.2015316;
6. I.S.Yahia, A.A. M.Farag, R. Jafer, J. Iqba, H.Y. Zahran, S. Chusnutdinow, T. Wojtowicz, G. Karczewski. Electrical, photovoltaic and photosensitivity characteristics of p-ZnTe:N/CdTe:Mg/n-CdTe:I/GaAs for photodiode applications. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017. Vol. 67, pp. 33-40;
7. V. Yu. Rud', Yu. V. Rud', V. Ch. Shpunt, E. I. Terukov. A New Type of Polarimetric Photodetectors for Analyzing of Laser Radiation in Optical Communication Lines/Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2016.Vol. 25, No. 1, pp. 40–44.

Акустооптический перестраиваемый источник света

Хохлов Д. Д.[1], Мачихин А. С.[1], Пожар В. Э.[2]

[1]НИУ «МЭИ»
[2]НТЦ УП РАН

Эл. почта: demid06101993@gmail.com

Источники оптического излучения с перестройкой по спектру находят широкое применение в спектроскопии, оптической когерентной томографии и других областях. В основу таких источников обычно заложен набор узкополосных светофильтров, заменяемых механически, или генератор суперконтинуума, сопряженный с перестраиваемым фильтром. Применение устройств первого типа затрудняется ограниченным набором доступных спектральных каналов. Существенным недостатком устройств второго типа

является наличие пространственных шумов, вызванных паразитной интерференцией. В настоящей работе предложено альтернативное решение для получения равномерной освещенности исследуемого объекта, лишенное указанных недостатков. Оно основано на акустооптической (АО) дифракции света. Длина волны излучения, пропускаемого АО фильтром, определяется периодом объемной дифракционной решетки, создаваемой в АО кристалле посредством звуковой волны [1]. Частота возбуждаемой звуковой волны соответствует задаваемой программно частоте электрического сигнала, подаваемого на пьезоизлучатель. В силу того, что АО фильтры обладают малой угловой апертурой, малым диаметром входного зрачка и узкой спектральной полосой пропускания, их совместное использование с широкополосными источниками света затруднительно даже при наличии соответствующей сопрягающей системы, предназначенной для оптимизации светоэнергетических и аберрационных параметров отфильтрованного излучения [2].

В данной работе демонстрируется, что эффективность перестраиваемых источников света на основе АО фильтров может быть существенно увеличена за счет частотной модуляции акустической волны [3, 4]. Правильный выбор параметров частотной модуляции позволяет увеличить размер области, в которой выполняется условие синхронизма, и, как следствие, повысить угловую апертуру и ширину спектральной полосы пропускания. Показано, что эффективный перестраиваемый источник света может быть создан только при одновременной оптимизации конфигурации АО фильтра, использовании частотной модуляции акустической волны и корректном оптическом согласовании элементов источника. Приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью макета такого источника.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01355).

Список литературы

1. Goutzulis A., Rape D., Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices, Marcel Dekker, New York, 1994;
2. Machikhin A.S., Batshev V.I., Polschikova O.V., Khokhlov D.D., Pozhar V.E., Gorevoy A.V., Conjugation of fiber-coupled wide-band light sources and acousto-optical spectral elements, Proc. SPIE, 10592, 105920I, 2017;
3. Magdich L.N., Transfer function of acousto-optic filter with frequency modulation, Optics and Spectroscopy, 49(2), 387-390, 1980;
4. Mazur M.M., Suddenok Y.A., Shorin V.N., Double acousto-optic monochromator of images with tunable width of the transmission function, Technical Physics Letters, 40(2), 167-169, 2014.

Особенности регистрации вариаций магнитного поля квантовым датчиком на основе феррофлюидной ячейки

Логунов С. Э.[1], Давыдов В. В.[1], Мазинг М. С.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: sema-logunov@yandex.ru

В настоящее время одной из задач прикладной физики является разработка различных приборов и устройств для контроля параметров магнитного поля в различных условиях (географических, сейсмологических и т.д.), а также в создающих его системах (из постоянных магнитов, электромагнит, соленоид и т.д.). Для решения этих задач разработаны различные типы: магнитометров, измерителей магнитного потока и датчиков [1-5]. В большинстве случаев каждый из этих приборов или датчиков предназначен для решения узкого круга конкретных задач, так как измерения необходимо проводить с высокой точностью. Наибольшей универсальностью, а также наилучшими показателями по точности измерения и чувствительности среди всех типов магнитометров и датчиков для контроля параметров магнитного поля обладают квантовые устройства [5-7].

В работах [4, 5] рассмотрена новая конструкция квантового визуализатора. Её использование позволяет исследовать структуру силовых линий магнитного поля, определять однородность поля в различных магнитных системах и т.д. Кроме того, проведенные нами исследования с использованием разработанного визуализатора позволили установить степень влияния различных факторов на однородность структуры силовых линий магнитного поля. Полученные результаты показали новые возможности использование феррофлюидных ячеек для создания различных датчиков, позволяющих получить решения крайне актуальных задач. Одной из которых является контроль движения больших магнитных объектов в сложных условиях (например, морские акватории и т.д.) с помощью пассивных автономных датчиков. Кроме достаточно жестких требований, которые предъявляются к данным датчиком (сложность их обнаружения, высокая помехоустойчивость и т.д.), они должны обладать высокой степенью надежности с точки зрения идентификации положения самого объекта в заданной зоне (например, при решении задач охраны или ликвидации несанкционированного вторжения).

В представленной работе рассматривается один из возможных вариантов создания квантовых датчиков на основе феррофлюиднызх ячеек. Проведенные ранее исследования позволили установить, что в случае размещения феррофлюидной ячейки в магнитном поле наночастицы ферромагнитной жидкости располагаются на силовых линиях

магнитного поля. Для лазерного излучения, падающего на прозрачные грани феррофлюидной ячейки, данная конфигурация наночастиц представляет собой подобие дифракционной решетки. Период данной решетки определяется расстоянием между силовыми линиями магнитного поля [4, 5]. Если феррофлюидная ячейка расположена в слабом однородном магнитном поле (например, с индукцией B_0 = 0.214 мТл при неоднородности 10^{-5} $см^{-1}$), которая создается специальным соленоидом, то дифракционная картина от прошедшего через неё лазерного излучения, регистрируемая на фотодиодной линейке относительно центрального максимума носит симметричный характер. В случае движения рядом с соленоидом постоянного магнита (имитация магнитного объекта) происходит искажение положения и формы максимумов в регистрируемой дифракционной картине, что означает изменению структуры силовых линий в зоне размещения феррофлюидной ячейки. В постоянное магнитное поле B_0 добавляется вариация, вызванная движением магнитного объекта. По изменению в регистрируемой дифракционной картине можно оценить величину данной вариации. Проведенные исследования показали ряд особенностей, связанных с воздействием магнитного поля подвижного объекта, на характер изменения в структуре силовых линий соленоида в зоне размещения феррофлюидной ячейки. Данные особенности связаны в первую очередь с геометрическим расположением плоскости, в которой регистрируется дифракционное изображение в квантовом датчике, относительно направления силовых линий магнитного объекта, а также размера и типа наночастиц в ферромагнитной жидкости.

Кроме того, проведенные эксперименты показали, что РЛС не вызывает искажений в структуре силовых линий в феррофлюидной ячейке. Это показывает высокую степень помехозащищенности разработанного нами датчика.

Список литературы

1. Заико А.И., Воробьев А.В., Иванова Г.А., Шарикова Г.Р., Магнитометрическая измерительная система параметров геомагнитного поля, Измерительная техника, № 5, С. 57 – 60, 2016;
2. Хвалин А.Л., Векторный магнитометр слабых магнитных полей, Измерительная техника, № 10, С. 45 – 48, 2014;
3. Игнатьев В.К., Перченко С.В., Трехканальная цифровой магнитометр, Измерительная техника, № 6, С. 117 – 118, 2013;
4. Логунов С.Э., Давыдов В.В., Кошкин А.Ю., Новый метод исследований структуры силовых линий магнитных полей, Тезисы докладов международной молодёжной конференции ФизикА.СПб, 24-26 октбяря, С. 171 – 172, 2017;
5. Logunov S.E., Koshkin A.Yu., Davydov V.V., Petrov A.A., Visualizer of magnetic fields, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 741 (1), P. 012092, 2016;
6. Вершовский А.К., Дмитриев С.П., Пазгалев А.С. Квантовый магнитометр с оптической накачкой, комбинирующий достоинства Mx и Mz устройств, ЖТФ, Т. 83, Вып. 10, С. 90-97, 2013;
7. Sapunov V.A., Denisov A.Y., Saveliev D.V., Soloviev A.A., Khomutov S.Y., Borodin P.B., Narkhov E.D., Sergeev A.V., Shirokov A.N, New vector/scalar Overhauser DNP magnetometers POS-4 for magnetic observatories and directional oil drilling support, Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal, Vol. 18, No 2, P.16209, 2016.

Влияние легирования барьерных слоёв на эффективность фотолюминесценции квантовых ям спектрального диапазона 1550 нм

Колодезный Е. С.[1], Рочас С. С.[1], Курочкин А. С.[1], Бабичев А. В.[1], Новиков И. И.[1], Гладышев А. Г.[1], Егоров А. Ю.[1], Карачинский Л. Я.[2], Савельев А. В.[1,3]

[1]ИТМО
[2]ООО "Коннектор Оптикс"
[3]СПбАУ РАН

Эл. почта: e.kolodeznyy@gmail.com

Основным методом повышения частоты прямой токовой модуляции вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300-1550 нм рассматривается увеличение дифференциального усиления активной области лазера [1, 2] за счет повышения механического напряжения в квантовых ямах (КЯ) [3]. Однако данный подход ограничивается наличием критической толщины, то есть невозможностью повышать напряжение несоответствия постоянных решётки КЯ и подложки InP выше 2,0-2,5 %. Дальнейшее повышение частоты модуляции требует комбинации с другими подходами, и наиболее перспективным видится использование селективного легирования активной области вблизи КЯ [4].

Исследуемые образцы напряженных гетероструктур InGaAlAs/InGaAs/InP были выращены методом молекулярной пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложке InP (100). Активная область гетероструктур состояла из 9 КЯ $In_xGa_{1-x}As$ (x=0.74), разделённых широкозонными барьерами $In_{0.53}Al_{0.20}Ga_{0.27}As$ толщиной 12 нм. Со стороны подложки и поверхности активная область ограничивалась слоями $In_{0.52}Al_{0.48}As$. Барьерные слои гетероструктур были легированы кремнием (примесью n-типа) или углеродом (примесью p-типа). Легирование проводилось в середину барьерного слоя, с использованием метода δ-легирования. Уровень легирования барьеров составил $(1.0, 5.0)\cdot10^{12}$ см$^{-2}$ для случая кремния и $(0.5\text{-}1.0\text{-}2.0\text{-}5.0)\cdot10^{12}$ см$^{-2}$ для случая углерода.

Исследование спектров фотолюминесценции показали, что при мощности возбуждения YAG:Nd лазера 9 мВт (длина волны генерации 532 нм), пиковая интенсивность спектра фотолюминесценции гетероструктуры со степенью легирования углеродом $2\cdot10^{12}$ см$^{-2}$ выше и его полуширина больше, чем для случая нелегированной гетероструктуры. Показано, что легирование p-типом приводит к росту эффективности фотолюминесценции при малых уровня возбуждения по сравнению с гетероструктурой с нелегированными барьерами, что достигается за счет полного заполнения дырочных уровней.

Анализ интегральной интенсивности (мощности) излучения от мощности накачки на основе метода изложенного [5] позволяет получить информацию о процессах безызлучательной рекомбинации гетероструктурах. Построенная зависимость отношения времени безызлучательной рекомбинации нелегированной гетероструктуры к времени безызлучательной рекомбинации легированных гетероструктур от уровня легирования, свидетельствует о существенном подавлении безызлучательной рекомбинации в легированных гетероструктурах.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014−2020 годы», соглашение № 14.578.21.0253, уникальный идентификатор RFMEFI57817X0253.

Список литературы

1. Michalzik R. VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers. London: Springer International Publishing, 2013;
2. Spiga S. et al., Single-mode 1.5-um VCSELs with small-signal bandwidth beyond 20 GHz, 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 1–4, 2016;
3. Babichev A. V et al., Molecular Beam Epitaxy Grown Strained Heterostructures for Active Region of Laser Diode With Emission Wavelength 1520-1580 nm, Mater. Phys. Mech., 24 (3), 284–288, 2015;
4. Vahala K.J., Zah C.E., Effect of doping on the optical gain and the spontaneous noise enhancement factor in quantum well amplifiers and lasers studied by simple analytical expressions, Appl. Phys. Lett., 52(23), 1945–1947, 1988;
5. Novikov I.I. et al, Temperature Dependence of the Effective Coefficient of Auger Recombination in 1.3 μm InAs⁄GaAs QD Lasers, Semiconductors, 39(4), 507-511, 2005.

Люминесценция гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgCdTe и InAsSb

Семакова А. А.[1], Мынбаев К. Д.[1], Баженов Н. Л.[2]

[1]ИТМО
[2]ФТИ

Эл. почта: antonina.semakova@gmail.com

HgCdTe и InAsSb являются важными материалами для изготовления фото- и оптоэлектронных устройств, работающих в инфракрасной области спектра. Данные полупроводниковые материалы значительно отличаются степенью ионности химических связей, однако имеют сходную зонную структуру. Эффективность устройств на основе данных материалов сильно зависит от скорости безызлучательной оже-рекомбинации, которая в узкозонных полупроводниках велика и представляет серьезную проблему при создании приборных структур. Считается, что создание структур на основе квантовых ям позволяет уменьшить скорость оже-рекомбинации, что делает исследования таких структур весьма актуальными. Вместе с тем, точная интерпретация оптических переходов в узкозонных полупроводниковых структурах с квантовыми ямами на сегодняшний день остается проблемой.

В настоящей работе сообщается о результатах исследований фотолюминесценции структур с одной квантовой ямой (КЯ) на основе HgCdTe (гетероструктура типа I) и электролюминесценции структур с множественными квантовыми ямами (МКЯ) на осно-

ве InAsSb (гетероструктура типа II), а также о результатах расчета энергии уровней размерного квантования и, соответственно, энергии возможных оптических переходов при люминесценции. Структуры на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ выращивались в Институте физики полупроводников (Новосибирск, Россия) методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с буферными слоями ZnTe/CdTe и имели состав в яме x_w=0.24 и в барьерах x_b=0.80. Ширина квантовой ямы составляла 12 нм. Структуры на основе InAsSb выращивались в компании Microsensor Technology, LLC (Санкт-Петербург, Россия) на подложках InAs и представляли собой МКЯ $16\times InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAs_{0.78}Sb_{0.07}P_{0.15}$ (6 нм/11 нм) с выращенным поверх барьерным слоем из InAsSbP. Эти структуры выращивались методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений.

Общей особенностью спектров люминесценции обоих типов структур было наличие пиков с энергией, намного большей, чем энергия расчетных оптических переходов между первыми уровнями квантования электронов и тяжелых дырок, при этом наблюдаемая энергия оказалась близка к энергии перехода между первым уровнем квантования электронов и легких дырок. В работе анализируется относительная вероятность оптических переходов между уровнями квантования электронов и тяжелых и легких дырок в рамках модели Кейна, учитывающей особенности зонной структуры рассматриваемых материалов.

Нагрев фотоэлектрического преобразователя падающим излучением: температура перегрева

Минтаиров М. А.[1], Евстропов В.В[1], Минтаиров С. А.[1], Шварц М. З.[1], Калюжный Н. А.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: mamint@mail.ioffe.ru

Нагрев фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) концентрированным излучением — известный эффект в концентраторной фотовольтаике. Известно, что элемент нагревается при работе внутри концентраторных установок. Однако, как было обнаружено в [1], нагрев фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) падающим излучением также происходит при измерении ВАХ на флеш-имитаторах солнечного излучения (СИ). Этот эффект был экспериментально исследован на зависимости V_{oc} (напряжение холостого хода) – J_{sc} (ток короткого замыкания). Было показано, что эта зависимость не является изотермической: напряжение V_{oc} меньше, чем в изотермическом случае [1]. В данной работе продолжено исследование этого эффекта. Величина понижения ΔV_{oc} используется для определения температуры перегрева ΔT (превышение температуры p-n перехода над температурой окружающей среды). В свою очередь зависимость $\Delta V - \Delta T$ позволяет корректировать измеряемые при больших мощностях падающего излучения ВАХ и получать изотермические ВАХ.

В диапазоне температур около и выше комнатной ΔV_{oc} пропорциональна температуре перегрева $\Delta V_{oc} = -\alpha\Delta T(\alpha 0)$. Величина температурного коэффициента α даётся формулой (1), полученной исходя из выражения $\Delta V_{oc} = -A(kT/q)ln(\frac{J_g}{J_0})$.

$$\alpha = 1/q(\beta + A \cdot k \cdot ln(\frac{J_g}{J_0})) \quad (1)$$

где $\beta = \left|\Delta E_g / \Delta T\right|$ — температурный коэффициент ширины запрещённой зоны, *q*- заряд электрона, *k*- постоянная больцмана, *A* – коэффициент идеальности p-n перехода, J_0^* — сомножитель, входящий в выражение для «тока насыщения» $J_0 = J_0^* \cdot exp(= E_g / AkT)$, J_0^* зависит от температуры по степенном закону, однако в указанном температурном диапазоне он полагается температурно независимым по сравнению с экспоненциальным сомножителем [2], J_g – фотогенерированный ток, E_g – ширина запрещенной зоны.

В многопереходных СЭ в формуле (1):

$$\beta = \sum \beta_i; A = \sum A_i; J_0^* = \sqrt[A]{(J_{01}{}^{A1} \cdot J_{02}{}^{A2} ... J_{0n}{}^{An})}; J_g = \kappa J_{g,min}$$

$$\kappa = \sqrt[A]{\kappa_1{}^{A_1} \kappa_1{}^{A_1} ... \kappa_n{}^{A_n}}; \kappa_i = \frac{J_{g,i}}{J_{g,min}}; J_{g,min} = min\left\{J_{g,1}, J_{g,2} ... J_{g,n}\right\}$$

Где n – количество субэлементов, i – индекс субэлемента. Отметим, что предложенные упрощения не понижают высокую точность определения коэффициента α. Поэтому экспериментально полученные в работе [3] зависимости α vs $ln(J_g)$ для GaAs и GaInP/GaAs/Ge ФЭП описывались формулой (1).

Определение температуры основано на сравнении «нагретой» (неизотермической) $V_{oc} - J_{sc}$ характеристики с референой изотермической характеристикой. Для экспериментального получения референой характеристики использовался разработанный способ [1]. Сущность способа: при резком (мгновенном) включении освещения температура в начальной стадии возрастает линейно со временем. Т.к. $\Delta V_{oc} \sim \Delta T$, то V_{oc} – падет со временем также линейно, что позволяет просто (линейно) экстраполировать V_{oc} к нулевому моменту времени (моменту включения освещения) и, тем самым, определить референое V_{oc}.

В работе были получены "нагретая" и изотермическая $V_{oc} - J_{sc}$ зависимости, используя которые была определена зависимость $V_{oc} - J_g$. Дополнительно, используя формулу (1) был проведен расчёт коэффициента α и построена зависисмость $\Delta V_{oc} - \Delta T$. При расчёте использовались известные из литературных источников данные. Как оказалось, обе построенные зависимости линейны, что связано со слабой (логарифмической) зависимостью коэффициента α от J_g. Это позволяет сделать вывод о линейном падении напряжения и при измерении ВАХ. Таким образом, для измерения изотермической ВАХ достаточно использовать линейную коррекцию напряжения.

Работа подготовлена при поддержке программы президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности»

Список литературы

1. M. A. Mintairov et al., AIP Conf. Proc. Freiburg (Germany), CPV-12, vol. 1766, p. 050005, 2016;
2. G. S. Kinsey et al., Prog. Photovoltaics, Res. Appl., vol. 16, pp. 503–508, 2008;
3. V. D. Rumyantsev et. al., IEEE J. Photovoltaics, vol 5 no 6, pp 1715-1721, nov. 2015.

Волноводный направленный ответвитель на основе золь-гель пленок

Павлов С. В.[1], Чехлова Т. К.[1]

[1]РУДН

Эл. почта: light_crusader89@mail.ru

В последнее время в литературе широко обсуждаются методы изготовления волноводных устройств на основе плёнок, полученных по золь-гель технологии [1], которая обеспечивает хорошие оптические характеристики и не требует применения дорогостоящего сложного оборудования, так как процесс формирования пленок – низкотемпературный.

Плёнки на основе золь-гель материалов обладают большим отрицательным термооптическим коэффициентом, что может быть использовано для корректировки интерференционных устройств интегральной оптики, таких как узкополосные фильтры и резонаторы, мультиплексоры и демультиплексоры и др., создания термостабильных и термоуправляемых устройств, таких как направленные ответвители [2].

В работе исследованы направленные ответвители на основе золь-гель пленок SiO_2-TiO_2 - устройства, предназначенные для ответвления части электромагнитной энергии из основного канала передачи во вспомогательный. Регулируя, путем изменения температуры, значения эффективных показателей преломления двух каналов ответвителя, можно добиться переключения, при котором энергия может быть разделена по двум каналам любым желаемым образом.

Для изменения температуры термоуправляемого материала могут быть использованы микроэлектроды или элементы Пельтье.

В работе приведены расчёты, описывающие термоуправляемые направленные ответвители на основе SiO_2-TiO_2. Проведены исследования зависимости характеристик ответвителя от параметров оптического волновода.

Список литературы

1. Грабовский Е.И., Живцов С.В., Чехлова Т.К. Температурная зависимость золь-гель волноводов // РЭ. – 2006. – Т.51, № 7. – С. 834;
2. Николаев Н.Э., Павлов С.В., Трофимов Н.С., Чехлова Т.К. Исследование температурного коэффициента эффективного показателя преломления TE1- и TM1-мод в оптических золь-гель волноводах // РЭ. – 2012. – Т. 57. № 1. – С.1–7.

Трехволновая оптоэлектронная система мониторинга процесса гемодиализа

Степанова О. С.[1], Коноплев Г. А.[1], Солнцев Н. А.[1], Земченков А. Ю.[2], Герасимчук Р. П.[2], Фрорип А.[3]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
[2]СПбГБУЗ «Городская Мариинская больница»
[3]Ldiamon AS, Эстония

Эл. почта: oksana_lopatenko@mail.ru

Гемодиализ (ГД) – процедура экстракорпорального очищения крови пациентов, страдающих хронической почечной недостаточностью, от продуктов метаболизма низкой молекулярной массы и излишков воды, реализуемая с помощью аппаратов «Искусственная почка» (ИП). Работа аппаратов ИП основана на процессах диффузионного и конвекционного переноса низкомолекулярных соединений из циркулирующей крови пациента в диализат.

ГД обычно проводится 3 раза в неделю и длится в среднем от 3 до 5 часов. Эффективность процедуры ГД оценивается по количеству выведенных за сеанс уремических маркеров, к числу которых относятся мочевина, креатинин, мочевая кислота и ряд других компонентов. Современные методы оценки эффективности лечения связаны с забором проб крови до и после сеанса ГД для последующего лабораторного анализа. В последнее десятилетие с целью повышения безопасности и эффективности процедуры разработаны и частично внедрены в клиническую практику системы онлайн-мониторинга состава оттекающего диализата в выходной диализной магистрали аппарата ИП [1-5].

В данной работе предлагается прямая спектрофотометрическая методика определения концентрации креатинина и мочевой кислоты в диализате, в основе которой лежит измерение спектрального поглощения диализата в трех узких спектральных интервалах 237…247 нм, 260…270 нм и 285…295 нм. Предложенная методика позволяет определять концентрации мочевой кислоты с относительной погрешностью не более 10%, креатинина – не более 20% (данные сопоставлялись с результатами биохимических исследований более 100 проб диализата) и дает возможность реализовать онлайн-мониторинг состава оттекающего диализата с использованием компактной и недорогой спектральной аппаратуры на базе УФ светодиодов.

Разработанная методика была реализована в трехволновом оптоэлектронном сенсоре, который обеспечивает автоматизированное измерение коэффициентов пропускания диализата в узких спектральных интервалах вблизи длин волн 247 нм, 262 нм и 287 нм. Сенсор включает в себя три УФ светодиода, конструктивно объединенные в одном корпусе, солнечно-слепой фотоприемник и проточную кварцевую кювету, подключенную к диализной магистрали аппарата ИП. Специализированное программное обеспечение обеспечивает установку режима регистрации, управление работой источников излучения, расчет концентрации уремических маркеров по предложенной методике и представление результатов мониторинга в удобной для врача форме; передача данных на компьютер осуществляется по интерфейсу USB.

Клинические испытания системы проводились в отделении гемодиализа Мариинской больницы Санкт-Петербурга. Исследования проведены для 25 сеансов ГД у 10 пациентов. Статистический анализ результатов исследования более 100 проб диализата показал, что концентрация мочевой кислоты может быть определена с помощью трехволнового сенсора с относительной погрешностью не более 10%, креатинина – не более 20% (данные сопоставлялись с результатами биохимического анализатора Beckman Coulter AU680). Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную оптоэлектронную систему для организации онлайн-мониторинга процесса ГД.

Список литературы

1. Daugirdas J.T., Tattersall J.E. Automated monitoring of hemodialysis adequacy by dialysis machines: potential benefits to patients and cost savings, Kidney Int. V. 78. P. 833-835. 2010;
2. Fridolin I. et al. Nutrition estimation of dialysis patients by on-line monitoring and kinetic modeling. Estonian Journal of Engineering. V. 14. P. 177-188. 2008;
3. Umimoto K, Tatsumi Y., Jokei K. Attempt to detect uremic substances in spent dialysate by optical measurement. Nephrol. Dial. Transplant. V. 22 (suppl 6). P. 127. 2007;
4. Василевский А.М., Коноплев Г.А. Поликомпонентный мониторинг процесса гемодиализа методом УФ спектрометрии. Биотехносфера. № 1. С. 18-25. 2009;
5. Василевский А.М. и др. Биспектральная оптоэлектронная система мониторинга процесса гемодиализа. Биотехнические системы. № 1. С. 7-15. 2013.

Взаимосвязь потерь на распространение с геометрическими параметрами оптических микроволноводов

Шапран Д. А.[1], Зарецкая Г. А.[1], Дроздовский А. В.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: shapran_97@mail.ru

В последние десятилетия основными проблемами микро- и функциональной электроники являются массогабаритные параметры и быстродействие используемых устройств [1]. В связи с этим, появилось новое научное-техническое направление, возникшее на стыке радиоэлектроники, СВЧ-оптоэлектроники, интегральной и волоконной оптики, фотоники, – радиофотоника. На основе принципов радиофотоники были разработан и в последствии создан ряд устройств таких, как: различные системы фильтрации, мультиплексоры и демультиплексоры, электрооптические модуляторы, оптоэлектронные генераторы, аналоговые процессоры [2] и др.

Основой компонентной базы интегральной радиофотоники являются оптические микроволноводы. В свою очередь, одним из главных факторов, ограничивающих применение и скорость работы устройств на основе таких микроволноводов, являются вносимые потери. Потери в микроволноводах зависят от нескольких факторов, важнейшими

из которых являются качество изготовления микроволновода и свойства материалов волновода и окружающего его диэлектрика. Вторым фактором является геометрия оптического волновода. Повышение качества используемых в микроволноводе материалов является в основном технологической задачей. Поэтому целью данной работы являлось изучение влияния геометрии на потери, возникающие при распространении оптической волны в микроволноводе.

Поперечное сечение исследуемой структуры оптического представляло собой диэлектрический волновод прямоугольного сечения, окруженный диэлектрической оболочкой. Отдельно следует отметить, что при моделировании в качестве материала оболочки был выбран оксид кремния (SiO_2), как наиболее часто используемый диэлектрик, применяемый для изоляции интегральных схем, а в качестве материала волновода при расчёте использовались следующие материалы: кремний (Si), нитрид кремния (Si_3N_4), нитрид кремния обогащенный кремнием (SiN_x). Данные материалы наиболее перспективны для создания интегральных радиофотонных приборов и устройств.

Моделирование дисперсионных свойств и декремента затухания производилось в пакете COMSOL Multiphysics. При последовательном изменении геометрии и потерь материала волновода производился расчёт действительной части эффективного показателя преломления и декремента затухания диэлектрического волновода для низшей моды E_{x11}.

Обнаружено, что зависимость потерь от геометрии оптического волновода (в частности от ширины волновода), имеет нелинейный характер с явно выраженным пиком. Возникновение пика связано с существованием двух процессов, влияющих на итоговые потери, вносимые волноводом. С одной стороны, увеличение ширины волновода ведёт к увеличению вносимых потерь за счёт концентрации волны в оптическом микроволноводе, с другой стороны скорость волны в структуре нелинейно зависит от геометрии волновода.

Работа выполнена в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" (соглашение 14.575.21.0157).

Список литературы

1. N. Daldosso, M. Melchiorri, F. Riboli, F. Sbrana, L. Pavesi, G. Pucker, C. Kompocholis, M. Crivellari, P. Bellutti, A. Lui. Fabrication and optical characterization of thin two-dimensional Si3N4 waveguides, materials science in semiconductor processing, p. 453-458, 2004;
2. David Marpaung, Chris Roeloffzen, Rene Heideman, Arne Leinse, Salvador Sales, Jose Capmany. Integrated microwave photonics, laser & photonics reviews, p. 1-30, 2012.

Исследование особенностей применения отражательного эшелона в задачах кинетической спектроскопии и информационной оптике

Глухов В. А.[1], Сясько А. В.[1], Толмачев Ю. А.[1,]

[1]СПбГУ

Эл. почта: vl.glukhov@inbox.ru

Исследуются особенности преобразования ультракороткого импульса устройством типа отражательного эшелона Майкельсона. Работа эшелона рассмотрена с позиции техники импульсного отклика системы на дельтаобразное возмущение. Актуальность задачи обусловлена возможностью применения эшелона в решении ряда современных задач оптики и ее приложений, таких как интерферометрия сверхкоротких лазерных импульсов, модуляция и преобразование спектра THz излучения, задачи абсорбционной спектроскопии с разрешением во времени [1, 2]. Отражение единичного ультракороткого светового импульса от элементов эшелона приводит к его преобразованию в последовательность копий импульса. Следствием этого преобразования является сильное изменению спектра сформированной последовательности сравнительно со спектром исходного импульса.

В работе детально рассматривается аналитическая теория преобразования спектра импульса света, отраженного от эшелона с фиксированными параметрами одинаковых ступеней: ширина и высота ступеньки, общее количество ступеней. Выведены зависимости изменения формы спектра от параметров такого эшелона. Полученные соотношения находятся в согласии с классической теорией отражательного эшелона Майкельсона при обычных способах его освещения. Сравнение вычисленного спектра ограниченной во времени последовательности импульсов в условиях тождественности параметров отражающих ступеней при нормальном падении излучения на эшелон с результатами эксперимента [1] показывает, однако, существенные различия в контрасте распределения интенсивности по частотам. Анализируются возможные причины расхождения. Показаны возможности управления глубиной модуляции и спектром отраженного от эшелона сигнала путем изменения параметров эшелона и способа его освещения.

Работа поддержана РНФ (проект 17-19-01097).

Список литературы

1. Benjamin K. Ofori-Okai, Prasahnt Sivarajah, W. Ronny Huang and Keith A. Nelson, THz generation using a reflective stair-step echelon, OPTICS EXPRESS, 24, No. 5, 2016;
2. G. Timothy Noe Ii, Ikufumi Katayama, Fumiya Katsutani et al, Single-shot terahertz time-domain spectroscopy in pulsed high magnetic fields, OPTICS EXPRESS, 24, No. 26, 2016.

Исследование приборных гетероструктур на основе напряженных сверхрешеток InAs/GaSb, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии

Федоров И. В.[1,2], Левин Р. В.[2,3], Пушный Б. В.[2,3], Зегря Г. Г.[2,1], Баженов Н. Л.[2], Усикова А. А.[2], Ратушный В. И.[4]

[1]ИТМО
[2]ФТИ
[3]НТЦ микроэлектроники РАН
[4]ВИТИ МИФИ

Эл. почта: kingwash@yandex.ru

Средний инфракрасный диапазон (3–5 мкм) находит множество применений в современном мире. Приборы, чувствительные в данном волновом диапазоне, используются для детектирования токсичных газов, для термографических систем, а также в тепловых головках самонаведения систем ПВО. Традиционно для производства данных приборов используется система материалов HgCdTe. Альтернативной системой материалов для данных приборов могут стать напряженные сверхрешетки InAs/GaSb. В данных структурах есть возможность понизить туннельные токи и скорость Оже-рекомбинации [1-2], что позволяет повысить рабочую температуру прибора на данных структурах.

В рамках данной работы была разработана технология выращивания диодных гетероструктур с напряженными сверхрешетками InAs/GaSb на подложках GaSb при температуре роста 500°C методом МОС ГФЭ. Были выращены сверхрешетки, состоящие из 20 пар чередующихся слоев InAs и GaSb одинаковой толщины. Толщины слоев составили 1 нм, 2 нм, 4 нм и меньше 1 нм. На основе данных структур были изготовлены диоды стандартным методом фотолитографии и травления меза-диодов площадью ~700 мкм. Омические контакты площадью 300 мкм изготавливались путем вакуумного осаждения системы материалов Cr/Au+Te/Au на подложку n-GaSb и Cr/Au+Ge/Au на прикрывающем слое p-GaSb соответственно. Контакт на прикрывающем слое p-GaSb был смещен относительно центра диода для обеспечения наибольшей площади поверхности излучения для изучения фото- и электролюминесценции. В спектрах фото- и электролюминесценции при T=77 K наблюдались следующие пики: с максимумом = 0.75 эВ (пик связан с подложкой GaSb) и с максимумом = 0.25 эВ (связан со сверхрешеткой InAs/GaSb). При сравнении спектров фото- и электролюминесценций наблюдалось их практически полное совпадение.

Данная работа проводилась при частичной поддержке гранта РФФИ №16-08-01130-а.

Список литературы

1. C. H. Grein, P. M. Young, H. Ehrenreich, Appl. Phys. Lett. 61, 2905 (1992);
2. D.L. Smith, C. Mailhiot, J. Appl. Phys. 62 (1987) 2545.

Инжекционные лазеры на основе многослойной активной области переходной размерности

Паюсов А.С[1], Шерняков Ю. М.[1], Серин А. А.[2,1], Надточий А. М.[3], Минатиров С. А.[1], Калюжный Н. А.[1], Кулагина М. М.[1], Гордеев Н. Ю.[1], Максимов М. В.[3], Жуков А. Е.[3]

[1]ФТИ
[2]СПбПУ
[3]СПБАУ РАН

Эл. почта: plusov@mail.ioffe.ru

Квантоворазмерные структуры, такие квантовые ямы (КЯ) и квантовые точки (КТ), находят широкое применение в качестве активной области различных оптоэлектронных приборов, и, в частности, для создания полупроводниковых инжекционных лазеров. Недавно мы предложили гибридный тип активной области [1], которая морфологически представляет собой промежуточный вариант между КЯ и КТ может рассматриваться как наноструктура переходной размерности (НПР). Активная область такого типа имеет более узкий спектр усиления и бóльшую величину максимального усиления по сравнению с квантовыми точками, меньшую длину латеральной диффузии носителей, чем в квантовых ямах, кроме того возможен рост большого числа активных слоёв (>20), не требующего компенсации упругих напряжений. Этот набор свойств очень интересен для применения в лазерах. Мы представляем исследование основных характеристик торцевых лазеров на основе новой активной области переходной размерности с различным числом слоёв.

Методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на подложках GaAs была выращена серия лазерных гетероструктур, содержащих 1, 2, 5 и 10 слоёв НПР в активной области. Слои активной области, разделённые прослойками GaAs толщиной 30 нм, были вставлены в волновод GaAs толщиной 0,7 мкм, размещённый между эмиттерами из $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$. Из эпитаксиальных гетероструктур были изготовлены торцевые лазеры с шириной полоска 50 мкм. При длинах резонатора более 1 мм все лазеры вне зависимости от количества слоёв в активной области работали на основном состоянии. При увеличении числа слоёв максимум излучения смещался в длинноволновую область (таблица 1), что коррелирует с уменьшением пороговой плотности тока, нормированной на количество слоёв. Количество слоёв не оказало существенного влияния на внутренний квантовый выход вынужденного излучения, который лежал в диапазоне 0,78-0,82. При увеличении числа слоёв растёт уровень внутренних оптических потерь.

Таблица 1. Основные параметры инжекционных лазеров на основе активной области переходной размерности в импульсном режиме накачки.

Число слоев	Пороговая плотность тока, *А/см²*	Длина волны излучения, *нм*	Внутренний квантовый выход вынужденного излучения	Внутренние оптические потери, *см⁻¹*
1	100	1088	0,79	0,7
2	120	1092	0,85	1,0
5	200	1108	0.82	1.5
10	375	1117	0.78	2.4

Также были проведены исследования спектров лазерной генерации, спонтанного излучения и ватт-амперных характеристик при непрерывной накачке. Приборы с длиной резонатора 4 мм с 1 и 2 слоями в активной области показали максимальную выходную оптическую мощность более 6 Вт, которая была ограничена катастрофической деградацией лазерных зеркал.

Таким образом, проведённое исследование показало, что гибридная активная область является перспективной для создания мощных лазеров, излучающих в диапазоне 1100 нм.

Список литературы

1. S. A. Mintairov *et al.*, “Hybrid InGaAs quantum well-dots nanostructures for light-emitting and photo-voltaic applications,” *Nanotechnology*, vol. 26, no. 38, p. 385202, 2015.

Многопереходные приемники-преобразователи для информационно-энергетических систем

Емельянов В. М.[1], Филимонов Е. Д.[1], Шварц М. З.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: vm.emelyanov@mail.ioffe.ru

Исследование вопросов использования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) не только для передачи информационного сигнала, но также и энергии посредством мощного лазерного излучения, приобрело особую актуальность в последнее время. Достоинствами этого способа являются [1]:

– идеальная гальваническая развязка между источником и потребителем, отсутствие создаваемых помех в радиочастотном диапазоне, а также собственная невосприимчивость линии к такому излучению;

– малая масса обеспечивающего связь кабеля, по сравнению с содержащим медные проводники;

– исключительно высокая стойкость кварцевого волокна к воздействию агрессивных сред, отсутствие химической и электрохимической коррозии;

– низкая металлоемкость кабеля.

Исследованы подходы к моделированию характеристик детекторов модулированного сверхвысокой частотой лазерного излучения на основе полупроводниковых гетероструктур, а также фотопреобразователей мощного лазерного излучения. Разработана математическая модель фотоэлектрического преобразования модулированного лазерного излучения для одновременной передачи информационного сигнала и энергии. Модель основана на численном решении нестационарной диффузионно-дрейфовой задачи, а

также построении распределенной эквивалентной схемы для расчета характеристик фотопреобразователя при сопряжении с внешними электрическими цепями.

Предложен подход к нахождению передаточной функции фотопреобразователя и достижимой информационной скорости в канале, основанный на моделировании его импульсной характеристики. С использованием этого похода исследован КПД и динамические свойства фотопреобразователей на основе GaAs, в том числе многопереходных, при преобразовании лазерного излучения с амплитудной модуляцией и модуляцией спектрального состава. Изготовлен макет двухпереходного фотопреобразователя модулированного лазерного излучения на основе гетероструктуры GaInP/GaAs.

Показано, что фотопреобразователи на основе GaAs могут быть применены в волоконно-оптических линиях связи для одновременной передачи как энергии, так и информационного сигнала. Установлено, что высокие значения КПД преобразования модулированного излучения могут быть получены только при незначительной глубине модуляции (±3–3,5 % от средней мощности), что при использовании простых режимов модуляции OOK требует использования пары источников ЛИ.

Установлено, что в таких режимах возможно достижение КПД преобразования модулированного лазерного излучения до 55 % с обеспечением информационной скорости до 400 Мбит/с при применении сравнительно простых законов модуляции и мощности излучения более 1 Вт. При этом для двухпереходных GaInP/GaAs/GaAs фотопреобразователей максимум КПД достигается в области больших мощностей. Это существенно превышает характеристики изветсных фотопреобразователей такого типа как по мощности, так и эффективности [2].

Предельные скорости передачи, ограниченные шумами приемного устройства, превышают 1 Тбит/с, однако их достижение требует создания специализированных источников сигнала, реализующих многоуровневую модуляцию.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант 17-08-00296).

Список литературы

1. Dumke M., Heiserich G., Franke S., Schulz L., Overmeyer L., Power Transmission by Optical Fibers for Component Inherent Communication, J. Systemics, cybernetics and informatics, v.8, no. 1, pp. 55-60, 2010;
2. Shi J.W., Tsai C.Y., Yang C.S., Kuo F.M., Hsin Y.M, Bowers J.E., Pan C.L., GaAs/In0.5Ga0.5P Laser Power Converter With Undercut Mesa for Simultaneous High-Speed Data Detection and DC Electrical Power Generation, IEEE Electron Dev. Lett., v.33, no. 4, pp. 561-563, 2012.

Органические солнечные элементы на основе системы ZnPc:C_{60}

Павлова М. Д.[1], Ламкин И. А.[1], Тарасов С. А.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: minaepanae@mail.ru

Объемы энергии из возобновляемых источников (такие как энергия воды, ветра, солнца и т.д.), а также существующие технологии уже сегодня дают возможность обеспечить человечество необходимой энергией. Наибольший вклад в энергию, получаемую от альтернативных источников, дает солнечная энергия. В настоящее время преобладают традиционные кремниевые солнечные элементы, но они обладают рядом недостатков, которые скомпенсированы в органических солнечных батареях. Несмотря на относительно невысокую эффективность преобразования солнечного излучения в таких элементах, их стоимость оказывается во много раз меньшей по сравнению с традиционными системами. Использование гибких пленочных подложек позволяет создавать батареи сложной формы и малого веса. В работе представлены результаты по созданию и исследованию элементов, созданных на основе низкомолекулярных и полимерных органических материалов с добавлением наночастиц.

Одними из перспективных органических материалов с точки зрения их использования для создания приборов солнечной энергетики являются фталоцианины металлов. Структуры на их основе обладают высокой чувствительностью в видимой области спектрального диапазона и могут формироваться на подложках малой толщины, в том числе гибких. Были созданы и исследованы структуры на основе фталоцианина меди (FTO/CuPc/PTCDA/Al) и фталоцианина цинка, содержащих фуллерены (FTO/ZnPc:C_{60}/C_{60}/Al и FTO/ZnPc:C_{60}/C_{60}/Bphen/Al). Слои органических материалов и алюминиевый контакт наносились методом вакуумного термического испарения. Исследования показали, что спектры фоточувствительности для структур FTO/CuPc/PTCDA/Al содержит две области с высоким фотоответом: от 450 до 600 нм и от 650 нм до 1000 нм, что качественно согласуется со спектром оптического пропускания нанесенных слоев. Интересным эффектом является наличие дополнительного максимума чувствительности на длине волны 648 нм. Рассматривается его связь с диагональными переходами между уровнями HOMO и LUMO соседних фоточувствительных слоев, входящих в состав структуры.

Было подробно рассмотрено влияние введения в органические фоточувствительные структуру фуллеренов. Наиболее интересные результаты были получены для структур на основе фталоцианина цинка, содержащие систему ZnPc:C_{60}/ C_{60}. Показано, что спектр фоточувствительности структуры FTO/ ZnPc:C_{60}/ C_{60}/Al имеет 3 области фотоответа, определяемые оптическими переходами с участием фуллерена, фталоцианина цинка и переходной структуры. Комбинирование этих эффектов, а также оптимизация технологических параметров создания структур, позволили расширить диапазон фоточувствительности в длинноволновую сторону до 1150 нм. Введение в структуру дополнительного транспортного слоя Bphen дало возможность понизить величины барьеров, возника-

ющих на границе слоев, и улучшить собираемость фотоносителей. В результате была получена структура, обладающая высокой чувствительностью в диапазоне 400 — 1150 нм. На основе проведенных исследований работе были созданы прототипы органических солнечных элементов, в которых достигается существенное увеличение эффективности преобразования солнечного излучения за счет введения в органическую матрицу включений фуллерена и оптимизации транспортных слоев в структуре.

Resonant silicon nanoparticles for efficiency and stability enhancement of perovskite solar cells

Фурасова А.[1], Макаров С.[1], Zahidov A.[1]

[1]ITMO University

Эл. почта: Furasova@inbox.ru

Nowadays lead halide perovskites have a huge number of possible optoelectronic applications including diodes, laser technologies, photodetectors but the main attention is focused on photovoltaics. Now PSCs achieved remarkable power conversion efficiency (PCE) values exciding 22% through a careful materials design and fabrication process optimizations. A lot of attempts was given to increase PCE by plasmonic NPs implementation into perovskite SC devices, which can increase charge transport but there is not any data about time stability of PSC contained chemical active plasmonic NPs. At the same time, Mie resonance silicon NPs recently has emerged as the powerful tool for various optical applications. Due to their low cost, chemical stability and temperature resistance these NPs represent a viable and better alternative to noble metals for photovoltaics application. In this work we incorporate Si NPs between mesoporous electron transport layer and $MAPbI_3$ to increase efficiency up to 18.8% by light absorption grow of photoactive layer. Moreover, Si NPs incorporation into PSC leads to the increase of such important parameters as open-circuit voltage, fill factor and short-circuit current. Also, after several days, the average efficiency grows for devices with Si NPs whereas reference devices have a tendency to efficiency decline.

Список литературы

1. Kuznetsov A, Miroshnichenko A, Brongersma M, Kivshar Y, Luk'yanchuk B, Optically resonant dielectric nanostructures, Science 354, 6314, 2016;
2. Tiguntseva E, Chebykin A, Ishteev A, Haroldson R, Balachandran B, Ushakova E, Komissarenko F, Wang H, Milichko V, Tsypkin A, Zuev D, Hu W, Makarov S, Zakhidov A, Resonant silicon nanoparticles for enhancement of light absorption and photoluminescence from hybrid perovskite films and metasurfaces, Nanoscale, 9, 34, 2017;
3. Sutherland B, Sargent E, Perovskite photonic sources, Nat. Photonics, 10, 2016.

Создание и исследование органических излучателей, содержащих коллоидные квантовых точки селенида кадмия

Михайлов И.[1], Еремеев М. А.[1], Дегтерев А. Е.[1], Ламкин И. А.[1], Лебедева Т. Д.[2], Тарасов С. А.[1], Соломонов А. В.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
[2]University of Manitoba, Canada

Эл. почта: iimihalov@gmail.com

Создание и исследование коллоидных квантовых точек (ККТ, CQD's) и приборов на их основе являются одними из самых перспективных направлений в современной электронике. Вместе с тем, в последние годы все большую актуальность приобретают органические полупроводниковые материалы и приборы на их основе, в частности, органические светоизлучающие диоды (OLED). Активно ведутся исследования органических светодиодов, содержащих в составе активного слоя коллоидные квантовые точки (ККТ). Квантовые точки, внедрённые в структуру OLED, позволяют повысить эффективность прибора благодаря высокому квантовому выходу люминесценции и дают возможность управлять свойствами излучения.

В ходе работы были созданы органические электролюминесцентные структуры, содержащие в своем составе коллоидные квантовые точки селенида кадмия. В работе были использованы наночастицы CdSe, покрытые широкозонной оболочкой ZnS, с лигандами олеиламин/триоктилфосфин. В качестве основного материала для исследований были выбраны ККТ, максимум пика фотолюминесценции которых находится на длине волны 645 нм. Была создана органическая электролюминесцентная структура ITO/PEDOT:PSS/TPD/TPD+CQD's CdSe/Alq3/Al. В качестве носителя для массива ККТ CdSe/ZnS был использован слой TPD, который наносился методом центрифугирования из смеси TPD и ККТ, растворенных в толуоле. Для оценки качества получаемых слоев было произведено измерение спектров фотолюминесценции и электролюминесценции образцов.

Для определения однородности создаваемых слоев в структуре исследования фотолюминесценции проводилось поточечно с использованием сканирования возбуждающего лазерного пучка по поверхности образца с заданным шагом. Далее была составлена карта отклонения мощности излучения фотолюминесценции от среднего значения. Исходя из карты можно сделать вывод, что для центральной области образцов достигнут достаточный уровень однородности излучения и, как следствие, распределения материала. Увеличение отклонения на внешних границах образца объясняется технологическими особенностями процесса центрифугирования и некоторым увеличением количества материала на краях образца вследствие влияния эффекта поверхностного натяжения. При формировании последующих слоев этот эффект усугубляется. В настоящее время ведутся работы по снижению влияния этого эффекта. Таким образом, для создания качественной структуры, следует избегать нанесения верхних алюминиевых контактов в областях, примыкающих к краям подложки. Тем не менее, слои на большей части образца

были весьма однородны по толщине и составу, что позволило при использовании отступе в 4 мм от края образца создать матрицу светодиодных чипов с высокой однородностью мощности излучения.

В завершающей части работы были созданы электролюминесцентные структуры ITO/PEDOT:PSS/TPD/TPD+CQD's CdSe/Alq3/Al и ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq3/Al. Показано, что введение коллоидных квантовых точек в состав структуры приводит к значительной модификации спектра электролюминесценции. В длинноволновой области возникает максимум, обусловленный электролюминесценцией коллоидных квантовых точек, интенсивность которого зависит от концентрации наночастиц и подаваемого напряжения смещения. Исследованы ватт-амперные и вольт-амперные характеристики структур, содержащие различные концентрации наночастиц в массиве. Обсуждается влияние распределение наночастиц и напряжения смещения на процессы токопереноса в структурах и электролюминесценцию в них.

В настоящее время ведутся работы по введению в состав структуры сформированного многокомпонентного массива коллоидных квантовых точек различного состава и размера, обладающего заранее заданным спектром фотолюминесценции. Использование таких массивов позволит создавать органические структуры, обладающие спектром электролюминесценции, близким к спектру излучения Солнца с индексом цветопередачи CRI выше 95.

Работа выполнена в рамках НИР проектной части государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, проект № 16.1750.2017/4.6.

Исследование нелинейных передаточных характеристик спин-волнового оптоэлектронного активного кольцевого резонатора

Витько В. В.[1], Никитин А. А.[1], Устинов А. Б.[1], Калиникос Б. А.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: vvvitko@etu.ru

Широкое применение в области исследования нелинейной волновой динамики нашли активные кольцевые резонаторы (АКР), состоящие из кольца обратной связи со спин-волновой линией задержки и СВЧ-усилителя [1-5]. Для генерации спектрально чистых и малошумящих СВЧ-сигналов все чаще используют оптоэлектронные кольцевые резонаторы, выполненные на оптических линиях задержки [6-8]. Преимущество таких схем заключается в достижении сверхвысокой добротности, которая определяется длиной оптического волокна [9]. Очевидно, что соединение в кольцо с обратной связью спин-волновой и оптической линий задержки открывает новые возможности для исследования нелинейных эффектов.

Цель данной работы заключается в исследовании особенностей нелинейных передаточных характеристик оптоэлектронных кольцевых резонаторов, с учетом спин-

волновой нелинейности. Исследуемый в работе АКР состоял из оптического тракта, включающего лазер, электрооптический модулятор, оптическую линию задержки на основе одномодового волокна и СВЧ фотодетектор, и СВЧ-тракта, состоявшего из спин-волновой линии задержки, СВЧ усилителя и аттенюатора, служащих для управления мощностью сигнала в кольце. Следует отметить, что такой активный кольцевой резонатор переходит в режим автогенерации СВЧ сигнала в случае, если СВЧ усилитель полностью компенсирует потери в кольце [9]. Особенностью данной схемы является то, что до порога автогенерации амплитуда сигнала, циркулирующего в оптоэлектронном кольце, значительно возрастает на резонансных частотах и превышает порог появления нелинейных спин-волновых явлений.

В работе было проведено экспериментальное исследование нелинейных передаточных характеристик спин-волнового оптоэлектронного АКР. Спин-волновая линия задержки представляла собой пленку железо иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 5 мкм. На поверхности пленки ЖИГ были сформированы две микрополосковые антенны, используемые для возбуждения спиновых волн. Расстояние между антеннами составляло 4 мм. Пленка ЖИГ была намагничена до насыщения 1750 Гс. Ориентация внешнего магнитного поля напряженностью 2630 Э, выбиралась таким образом, чтобы обеспечить распространение прямых объемных спиновых волн. Оптический тракт АКР состоял из коммерчески доступных элементов, обеспечивающих частотный диапазон работы 10 ГГц и одномодового волокна длиной 100 м. Измерения передаточных характеристик проводились до порога автогенерации АКР при помощи векторного анализатора цепей. Увеличение коэффициента усиления приводило к нелинейному сдвигу резонансных частот в область высоких частот на 110 кГц. Важно отметить, что вблизи порога автогенерации наблюдалась бистабильность передаточных характеристик. Для описания наблюдаемого эффекта, была разработана теория, описывающая резонансные свойства кольца с учетом нелинейности колебаний намагниченности. Нелинейное дисперсионное уравнение было получено из линейного путем учета зависимости статической намагниченности от амплитуды спиновых волн. При этом квадрат амплитуды спиновых волн задавался как произведение квадрата амплитуды входного сигнала на коэффициент передачи кольца по мощности. Задавая волновое число спиновой волны как независимую переменную, определялась частота спиновой волны. Подстановка полученных нелинейных волновых чисел в линейный коэффициент передачи позволила рассчитать нелинейные передаточные характеристики АКР. На заключительном этапе проводилось сравнение нелинейных передаточных характеристик спин-волновых оптоэлектронных резонаторов, полученных в результате численного моделирования и экспериментального исследования.

Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки (проект «Госзадание»).

Список литературы

1. Kalinikos B. A., Kovshikov N. G., and Patton C. E., Decay free microwave magnetic envelope soliton pulse trains in yttrium iron garnet thin films, Phys. Rev. Lett., Vol. 78, pp. 2827 – 2830, 1997;

2. Demidov V. E. and Kovshikov N. G., Mappings leading to randomization of an envelope of high-intensity spin waves, Technical Physics Letters, Vol. 24, № 8, pp. 647-649., 1998;
3. Demokritov S. O., Serga A. A., Demidov V. E., Hillebrands B., Kostylev M. P., and Kalinikos B. A., Experimental observation of symmetry-breaking nonlinear modes in an active ring, Nature, Vol. 426, № 6963, pp. 159-162, 2003;
4. Wu M., Kalinikos B. A., Carr L. D., and Patton C. E., Observation of spin-wave soliton fractals in magnetic film active feedback rings, Phys. Rev. Lett., Vol. 96, № 18, article 187202, 2006;
5. Ustinov A. B., Demidov V. E., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A., and Demokritov S. O., Observation of the chaotic spin-wave soliton trains in magnetic films, Physical review letters, Vol. 106, № 1, p. 017201, 2011;
6. Soto-Crespo J. M., Grapinet M., Grelu P., and Akhmediev N., Bifurcations and multiple-period soliton pulsations in a passively mode-locked fiber laser, Physical Review E, Vol. 70, № 6, article 066612, 2004;
7. Zhao L. M., Tang D. Y., and Zhao B., Period-doubling and quadrupling of bound solitons in a passively mode-locked fiber laser, Optics communications, Vol. 252, № 1, pp. 167-172, 2005;
8. Li F., Feng X., Zheng H., Lu C., Tam H. Y., Kutz J. N., and Wai P. K. A., Multiwavelength lasers with homogeneous gain and intensity-dependent loss, Optics Communications, Vol. 284, № 9, pp. 2327-2336, 2011;
9. Yao X. S., Maleki L., Optoelectronic microwave oscillator, JOSA B, Vol. 13, № 8, pp. 1725-1735, 1996.

Комбинированные пленки ITO в качестве прозрачных контактов для синих AlInGaN светодиодов

Павлюченко А. С.[1], Марков Л. К.[1], Смирнова И. П.[1], Левицкий В. С.[2]

[1]ФТИ
[2]ООО НТЦ ТПТ

Эл. почта: alexey.pavluchenko@gmail.com

В последнее время прозрачные проводящие оксиды получили повсеместное распространение в оптоэлектронных приборах различного назначения (жидкокристаллические дисплеи, сенсорные панели, солнечные элементы и пр.), поскольку покрытия на их основе обеспечивают достаточные значения пропускания света и электропроводности. Наиболее распространенным из них является оксид индия олова (ITO), обладающий оптимальным соотношением прозрачности в видимом диапазоне спектра и удельного сопротивления.

Одним из применений пленок ITO является их использование в качестве контактных площадок в светодиодных кристаллах на основе AlInGaN [1, 2]. Высокое значение работы выхода материала ITO (~4,6 eV) и, как следствие, приемлемые значения контактного сопротивления к слоям p-GaN в сочетании с хорошей электропроводностью и высокой

прозрачностью в синей области спектра существенно увеличивают внешний квантовый выход светодиодов с контактами на основе пленок ITO. Тем не менее, увеличение эффективности вывода света может быть достигнуто подбором структуры пленок и методов их нанесения за счет изменения эффективного показателя преломления.

В работах [3, 4] нами были продемонстрированы светодиодные кристаллы AlGaInN face-up конструкции, в которых в качестве верхнего прозрачного контакта к области p-GaN использовались пленки ITO, полученные различными методами нанесения на поверхность светодиодных кристаллов. Было изучено влияние методов получения тонких пленок ITO на их свойства и показано, что нанесение методом магнетронного распыления на холодную подложку с последующим отжигом при температуре выше 400°C в атмосфере азота позволяет формировать плотные пленки, а использование метода электронно-лучевого испарения при нанесении на нагретую до температуры выше 400°C подложку, позволяет формировать структурированные пленки с эффективным показателем преломления около 1.2.

В работе [5] нами был предложен способ создания прозрачных проводящих покрытий на основе оксида индия и олова с контролируемым значением показателя преломления. Способ заключается в последовательном нанесении материала методами электронно-лучевого испарения и магнетронного распыления. Разная плотность получаемых покрытий и, соответственно, различные значения их показателя преломления достигаются варьированием соотношения массовых долей вещества, наносимого разными методами. Измерения спектров пропускания-отражения таких пленок в сочетании с численным моделированием, тем не менее показывает, что такие пленки обладают переменным вдоль оси, перпендикулярной плоскости подложки профилем показателя преломления.

В настоящей работе предлагается использовать комбинированные пленки, образованные плотным подслоем ITO, получаемым методом магнетронного распыления на холодную поверхность, в сочетании с последовательно нанесенными слоями методами электронно-лучевого испарения и магнетронного распыления. Плотный подслой снижает контраст показателя преломления на границе с GaN, верхний комбинированный слой подбирается с учетом показателя среды, в которую выводится излучение. Сочетание толщин подслоя и верхнего комбинированного слоя, а также соотношение массовых долей вещества в комбинированном слое определяют условия интерференции.

Для определения оптимальных параметров представленные пленки моделировались последовательными слоями, характеризуемыми различной плотностью материала. Эффективная диэлектрическая проницаемость слоев определялась из объемного коэффициента заполнения в предположении нормально ориентированных пустот [6]. Такое предположение согласуется со структурой материала, наблюдаемой на изображениях пленок, полученных РЭМ. Расчет пропускания выполнялся методом матриц переноса [7] для многослойной пленки в сочетании с френелевским отражением задней границы подложки.

Полученные результаты позволяют определить параметры нанесения пленок ITO, приводящие к формированию пленок с профилем эффективного показателя преломле-

ния оптимальным для вывода света из светодиодного кристалла при заданной геометрии.

Список литературы

1. Jong Kyu Kim, J.-Q. Xi, and E. Fred Schubert, Omni-directional reflectors for light-emitting diodes, SPIE Proc., p. 6134, 2006;
2. C S Chang, S J Chang, Y K Su et. al., InGaN/GaN light-emitting diodes with ITO p-contact layers prepared by RF sputtering, Semiconductor Science and Technology,18, 4, L21. 2003;
3. Смирнова И.П., Марков Л.К., Павлюченко А.С., Кукушкин М.В., Светодиоды AlGaInN с прозрачным р-контактом на основе тонких пленок ITO, ФТП.,Т. 46. № 3. С. 384-388. 2012;
4. Смирнова И.П., Марков Л.К., Павлюченко А.С., Кукушкин М.В., Павлов С.И., Оптимизация технологии нанесения тонких пленок ITO, применяемых в качестве прозрачных проводящих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов., ФТП, Т. 48. № 1. С. 61-66. 2014;
5. Марков Л.К., Смирнова И.П., Павлюченко А.С., Кукушкин М.В., Закгейм Д.А., Павлов С.И., Способ получения пленок ITO с контролируемым значением показателя преломления, ФТП, Т. 50. № 7. С. 1001-1006. 2016;
6. В.И. Оделевский. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем, ЖТФ, 21Б (6), 678−685. 1951;
7. М. Борн, Э. Вольф, Основы оптики, М., Наука, 1970.

Технологические аспекты формирования элементов оптоэлектронной системы съема информации шаровых гироскопов

Юльметова О. С.[1], Туманова М. А.[1], Щербак А. Г.[1]

[1]АО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"»

Эл. почта: Olga@yulmetova.ru

Современные шаровые гироскопы — это сложнейшие приборы, технологии изготовления которых вобрали последние достижения науки и техники. Доказательством служит эксперимент Gravity Probe B [1] по измерению чрезвычайно слабых эффектов геодезической прецессии гироскопов на околоземной орбите для проверки отдельных положений теории относительности Эйнштейна. Объектом настоящих исследований является одна из модификаций шарового гироскопа — бескарданный электростатический гироскоп, применяемый в системах определения ориентации орбитальных космических аппаратов [2], так и в приборах внутритрубной диагностики при газо и нефте добыче [3]. Принцип работы этого гироскопа основан на оптическом съеме сигнала, отраженного от поверхности сферического ротора, вращающегося в вакуумированной камере под действием сил электромагнитного поля. На поверхности ротора выполняется контрастный рисунок из чередующихся светлых и тёмных полос, наклонённых под

определённым углом к широтным сечениям окружности ротора. Оптоэлектронные датчики облучают поверхность ротора и преобразуют отражённый от ротора модулированный световой поток в электрические сигналы. Полезная информация об изменении углового положения оси вращения ротора относительно оси пары датчиков, содержащаяся в разности фаз сигналов датчиков, позволяет оценивать угол поворота подвижного основания, на котором размещен гироскоп, путем сопоставления данных с датчиков с калибровочной кривой. Очевидно, что точность и стабильность функционирования системы съема во многом определяется качеством растрового рисунка, для формирования которого могут использоваться различные методы. А наиболее объективная оценка эффективности этих методов связана с анализом выходных параметров оптоэлектронной системы съема информации. В связи с этим целью работы является сравнительный анализ технологий создания контрастных рисунков, обеспечивающих функционирование оптоэлектронной системы съема информации бескарданного электростатического гироскопа. Для достижении цели решается ряд задач, связанных с выбором технологий формирования оптических изображений и определением критериев их сравнения. Традиционно оптические изображения на поверхность гироузлов наносятся методом электрохимического маркирования [4]. Однако более перспективной на сегодняшний день является технология локального лазерного окисления [5]. Применение этого метода при решении задачи формирования контрастного изображения на поверхности ротора позволило разработать ремонтопригодную технологию с высокой воспроизводимостью результатов, упростившую модель погрешности оптоэлектронной системы съема информации бескарданного электростатического гироскопа.

Список литературы

1. C. W. F. Everitt et al. Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity. Phys. Rev. Lett. 106, 221101 (2011);
2. Ландау Б.Е., Емельянцев Г.И., Левин С.Л. и др. Основные результаты разработки и испытаний системы определения ориентации на электростатических гироскопах для низкоорбитальных космических аппаратов. Гироскопия и навигация.№2(57). С.3-12. 2007;
3. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Ландау Б.Е. О применении бескарданного электростатического гироскопа в составе навигационного комплекса внутритрубного измерительного прибора. Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. С 332-340. 2015;
4. О.С. Юльметова, А.Г. Щербак, В.П. Вейко и др. Патент РФ № 2498224 от 05.06.2012 г. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа;
5. A Scherbak, O Yulmetova. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optical read-out systems. Optics & Laser Technology 101, 242-247, 2018.

Resonance spectra of the electron-ripplon oscillations in a two-dimensional electron crystal over liquid helium

Sharapova Iryna[1], Syvokon V. E.[1]

[1]B. Verkin ILTPE of NASU, Ukraine

Эл. почта: sharapova@ilt.kharkov.ua

The spectrum of coupled electron-ripplon oscillations in the Wigner crystal is studied experimentally, depending on amplitude of the exciting signal. Increasing the exciting voltage is found to cause the noticeable spectrum distortion and the shift of the resonances down to lower frequencies. Excitation of the non-axisymmetrical oscillations is found under of the spectra analysis. Because of radial symmetry of the cell and the exciting electrode a possible reason for such excitations may be the crystal lattice distortion. It is suggested under analysis that the electron-ripplon interaction contributes only in the electron effective mass renormalization.

Принципы построения полупроводниковой Фурье-спектроскопии для газового анализа на примере разработки тонкопленочных датчиков концентраций летучих углеводородов с помощью редкоземельных элементов

Казаков С. А.[1], Гревцев М. А.[1], Хавров Г. Д. [2]

[1]ФТИ
[2]СПбПУ

Эл. почта: Kazakov59@mail.ioffe.ru

Недавние публикации [1, 2] относительно механизма взаимодействия полупроводникового сульфида самария *(SmS)* и материалов на его основе с кислородом воздуха и с легколетучими углеводородами (например, метан, пропан и другие гомологи) [3] с целью разработки высокоселективных датчиков концентраций этих компонентов [4, 5], позволяют сформулировать основные принципы построения полупроводниковой Фурье-спектроскопии для газового анализа. При этом на практике решается задача увеличения 3-х *«s»* (селективность, чувствительность и стабильность работы датчиков). В настоящей работе приводятся первые экспериментальные данные, полученные для системы детек-

тирования микропримесей пропана в атмосферном воздухе с помощью полупроводниковых датчиков *SmS*, изготовленных по золь-гель технологии.

На примере разработки и исследования электрофизических характеристик газовых датчиков пропана получены первые спектральные данные. В качестве материалов газочувствительного слоя сенсоров выбраны сульфид самария [2] и твердый раствор $Sm_{1-x}Eu_xS$ [3]. В работе предложен новый подход к анализу экспериментальных данных, основанный на модификации оптических методов Фурье-спектроскопии под задачи полупроводникового газового анализа. Это позволяет однозначно решать вопрос увеличения селективности газового сенсора на примере его работы в достаточно сложной многокомпонентной газовой смеси из летучих углеводородов, содержащихся в атмосферном воздухе. Сущность представленного подхода состоит в том, чтобы, пользуясь аналогией с оптическими измерениями, в основном, в ИК области оптического спектра, при детектировании микропримесей летучих углеводородов из данных измерений электропроводности газочувствительного элемента во времени, наблюдаемые при адсорбции газов на поверхности датчика, получить оптический аналог спектральной характеристики сенсора. С этой целью следует изменить процедуру работы газочувствительного элемента. Новизна предлагаемой технологии состоит в том, чтобы производить периодическое сканирование сигнала детектора по температуре его поверхности, осуществляя периодический нагрев и охлаждение газочувствительного элемента датчика, как при калибровке, так и в процессе измерений. При этом, из суммарного изменения его электропроводности во времени при нагреве датчика в анализируемой среде путем применения к получаемым данным преобразований Фурье удается получить оптический аналог спектральной характеристики газового датчика.

Относительная электропроводность детектора $(\sigma(t)/\sigma o)$ является оптическим аналогом относительной интенсивности поглощенного излучения $(I(t)/Io)$, а амплитудно-частотная характеристика датчика, выраженная в единицах $kT(t)$ (в нашем случае в eV), является оптическим аналогом амплитудно-частотной характеристики поглощенного излучения, выраженного в единицах кванта энергии hv (например, для ближней ИК области оптического спектра). Следует отметить, что данные предварительной калибровки химического сенсора по бинарным газовым смесям позволяют выделить из полезного сигнала детектора амплитудно-частотный спектр концентрационного воздействия на проводимость полупроводника того или иного компонента измеряемой газовой смеси. При этом получаемая частотная характеристика датчика оказалась фиксированной при различных концентрациях и основана на экспериментальном факте существования оптимальной температуры детектирования того или иного компонента газовой смеси. Это подтверждено нами при выполнении процедуры калибровки сенсора по поверочным газовым смесям, при этом получаемая при измерениях частотная характеристика датчика ответственна за селективность и за стабильность его работы (отсутствие частотного сдвига при калибровке датчика и при измерении). В то же время, амплитуда выделенной частоты ответственна за концентрационное воздействие того или иного измеряемого компонента газовой смеси, что подтверждается экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-03-00660 А).

Список литературы

1. Каминский В.В., Казаков С.А., Романова М.В., Шаренкова Н.В., Гревцев М.А. Модель барьерной проводимости в поликристаллах сульфида самария. ФТТ, т. 57, выпуск 2, с.264-266, 2015;
2. Казаков С.А., Каминский В.В., Соловьёв С.М., Шаренкова Н.В. Полупроводниковые газовые датчики кислорода на основе поликристаллических плёнок сульфида самария. Научное приборостроение, т.25, в.3, с.116-123, 2015;
3. Казаков С.А.; Каминский В.В.; Шаренкова Н.В.; Соловьев С.М.; Гревцев М.А. Полупроводниковые датчики метана на основе поликристаллических пленок состава Sm(1-x)EuxS во взрывобезопасном исполнении. Научное приборостроение, т.27, с. 3-7, 2017;
4. Казаков С.А., Каминский В.В., патент РФ № 2546849. Полупроводниковый датчик кислорода. БИ №10 от 10.04.2015;
5. Казаков С.А., Каминский В.В., Соловьёв С.М., Шаренкова Н.В., патент РФ № 2623658. Полупроводниковый датчик метана. БИ №19 от 28.06.2017.

Гидрофобные покрытия на основе кремнеземсодержащего сырья низкого качества

Данилов В. Е.[1], Русинова Я. М.[1], Айзенштадт А. М.[1]

[1]САФУ им. М.В. Ломоносова

Эл. почта: v.danilov@narfu.ru

В настоящее время разработана теоретическая основа, позволяющая создавать гидрофобные и супергидрофобные покрытия поверхности материалов на основе наноразмерного диоксида кремния [1-5]. Однако сдерживающими факторами широкого внедрения этих технологий в индустрии строительных материалов являются: технологическая сложность (многоступенчатость) получения и нанесения данных покрытий, дороговизна исходных материалов и реактивов, достаточно строгие требования к размерным параметрам (использование наночастиц SiO_2 диаметром 10-25 нм) [6-9]. Целью настоящих исследований является разработка упрощенного способа получения гидрофобных покрытий на основе кремнеземсодержащего сырья низкого качества.

В качестве объекта исследования была выбрана суспензия диоксида кремния со среднеобъемным размером частиц 195 ± 95 нм, полученная путем механоактивации на коллоидной мельнице низкокачественного (содержание диоксида кремния менее 90%) полиминерального карьерного песка месторождения «Холмогорское» (Архангельской обл.). В качестве основы для синтезируемого покрытия использовались стеклянные подложки.

Получение супергидрофобного покрытия проводили по двум вариантам. Первый вариант заключался в следующем: получение суспензии коллоидного кремнезема путем механического диспергирования полиминерального песка на коллоидной мельнице; ак-

тивной самопроизвольной седиментации частиц твердой фазы суспензии на поверхности подложки путем нарушения агрегативной устойчивости системы (достижение изоэлектрического состояния частиц, при котором дзета-потенциал равен нулю). Данный эффект достигается за счет изменения протолитических свойств дисперсионной среды. Так установлено, что добавление в реакционную систему 0,1 моль/л раствора HCl до величины pH 2,7 позволяет получить частицы в системе, имеющие заряд близкий к нулю. Второй вариант отличался от первого тем, что полученный поверхностный слой из тонкодисперсных частиц кремнеземсодержащего сырья дополнительно обрабатывался парафинсодержащей водной эмульсией. Величину дзета-потенциала контролировали на анализаторе Delsa Nano C методом измерения скорости электрофореза. Гидрофобность поверхности характеризовали по углу смачивания, определяемому на установке EASY DROP фирмы «KRUSS».

Полученные результаты показали, что для создания устойчивого гидрофобного покрытия с краевым углом порядка 90º-120º достаточно использования тонкодисперсного кремнезема, для увеличения углов смачивания (>120º) возможно применение гидрофобизатора на основе парафиновой эмульсии. Кроме того, необходимо отметить, что данный подход дает возможность управления процессом гидрофобизации поверхности за счет изменения степени ее гидрофобности (последнее зависит от геометрических и размерных характеристик создаваемой поверхности). Так, например, путем изменения протолитических свойств дисперсионной среды гидрозоля кремнезема или концентрации частиц дисперсной фазы можно изменять структурные и размерные характеристики поверхности минерального покрытия.

Список литературы

1. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение, Успехи химии, 77(7), С. 619-638, 2008;
2. Prasad G, Anand Prabu A. A short review on hybrid PVDF-nanomaterials based super-hydrophobic coatings, Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 7(2), pp. 1808-1818, 2016;
3. H. Ogihara, J. Xie, T. Saji, Controlling surface energy of glass substrates to prepare superhydrophobic and transparent films from silica nanoparticle suspensions, J. Colloid Interface Sci. 437, pp. 24–27, 2015;
4. Kousaalya, Garg and Kumar Silica-based superhydrophobic coating by a single-step process, Surface Innovations, pp. 1-8, 2013;
5. Salamianski A.E., Zhavnerko G.K., Agabekov V.E., Sinkevich Y.V. Superhydrophobic coatings from nanoparticles of silicon dioxide, Reports of the national academy of sciences of Belarus, Volume 57, №1, pp. 63-66, 2013;
6. Клишин А.В., Миронюк А. В., Дудко В.А., Баклан Д.В., Чашка-Ратушный В.П., Тарасенко Д.В. Структура поверхности супергидрофобных покрытий на основе кремнезема, Scientific Journal «ScienceRise», №10/2(27), С. 61-66, 2016;
7. Manafi S., Nasab M.M. Hydrophobic coating production with its hydrophobic properties and pollution self-removed by concentrations of silica nanoparticles, Bulgarian Chemical Communications, Volume 49, Special Issue J, pp. 266 – 272, 2015;
8. Jean-Denis Brassard, D.K. Sarkar and Jean Perron, Fluorine based superhydrophobic coatings, Appl. Sci., 2, pp. 453-464, 2012;

9. Junpeng Liu, Zaid A. Janjua, Martin Roe, Fang Xu, Barbara Turnbull, Kwing-So Choi and Xianghui Hou, Super-hydrophobic/icephobic coatings based on silica nanoparticles modified by self-assembled monolayers, Nanomaterials, 6, 232 pp. 1-10, 2016.

Лазерно-индуцированная полевая эмиссия электронов из металла в низкочастотном пределе

Михин Е.[1], Дробышев А. А.[1], Головинский П. А.[1]

[1]ВГТУ

Эл. почта: mihinzheny@mail.ru

В работе представлено обобщение теории Фаулера-Нордгейма [1] для случая электронной эмиссии из металлической поверхности находящейся под воздействием поля лазерной волны. В низкочастотном пределе получены выражения для электронных токов и спектров с учётом перерассеяния эмитированных электронов на поверхности металла. Имеется хорошее соответствие полученных теоретических выражений с экспериментальными данными.

Подавляющее большинство теоретических моделей полевой электронной эмиссии основывается на модели Зоммерфельда газа свободных электронов внутри металла, движущихся в одномерном потенциале на границе твердого тела и вакуума и полуклассическом представлении о том, что поток электронов в вакууме равен числу столкновений электронов внутри металла с поверхностью, умноженному на коэффициент прохождения [2]. Используемая в нашей работе модель является одночастичной, в том смысле, что взаимодействие электронов отвечает только за общий однородный потенциал с резким изменением на границе. Модель эмиссии является одномерной и предполагает сохранение составляющих импульса, параллельных поверхности раздела, т.е. игнорируются возможные геометрические неоднородности и дефекты структуры эмиттера. Для описания эффективного потенциала используется потенциал в виде суммы потенциала прямоугольной ямы и потенциала изображения. Работа выхода электронов предполагается независящей от внешнего электрического поля, поскольку электрическое поле не проникает внутрь металла (это предположение нарушается для полупроводников и наноструктур, подобных углеродным нанотрубкам). Электроны внутри металла находятся в равновесном состоянии и имеют распределение Ферми-Дирака по энергиям.

Как известно, режим нелинейной эмиссии зависит от частоты туннелирования [3]. Если параметр адиабатичности Келдыша оказывается много меньшим единицы, то процесс электронной эмиссии носит квазистатический характер, мгновенная вероятность которой может быть рассчитана при фиксированном текущем значении внешнего поля. В этом заключается низкочастотное приближение, широко использующееся для описания нелинейной ионизации атомов [4] и применяемого в нашей работе.

При туннельной эмиссии в низкочастотном переменном поле электроны выходят из-под барьера с нулевой начальной скоростью при разных фазах поля. Дальнейшая их динамика может быть описана в рамках классических законов движения. При этом оказывается возможным возврат электронов обратно к поверхности металла и перерассеяние на ней. Этот процесс приводит к увеличению максимальной энергии эмитированных электронов до 10 пондеромоторных потенциалов. Учёт процесса перерассеяния был произведён с использованием коэффициента упругого отражения *R* электронов поверхностью металла. Его сильная зависимость от ориентации кристаллографических плоскостей, наличия адсорбированных газов на поверхности металла, а также структуры поверхности [5] не позволяет использовать выражения для R, полученные из простых теоретических моделей. Поэтому в работе расчёт спектра эмитированных электронов с учётом перерассеяния был произведён с использованием экспериментальных значений *R*.

Список литературы

1. Fowler R.H, Nordheim L, Electron Emission in Intense Electric Fields, Proc. Roy. Soc. A 119, 173, 1928;
2. Gurevich Yu. Ya, Theory of External Photoeffect from the surface of a metal, Soviet Phyasics JETP 27, 114, 1968;
3. Karnakov B.M, Mur V.D, Popruzhenko S.V, Popov V. S, Current progress in developing the nonlinear ionization theory of atoms and ions, Physics Uspekhi 58, 3, 2015;
4. Smirnov M.B, Krainov V.P, Hot electrons in the tunnelling ionization of atoms, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 31, L519, 1998;
5. Khan I.H, Hobson J. P, Armstrong R. A, Reflection and Diffraction of Slow Electrons from Single Crystals of Tungstenб Phys. Rev. 129, 1513, 1963.

Глиоксаль и его производные для стабилизации алюмосиликатных коллоидно-дисперсных систем

Соколова Юлия[1], Айзенштадт А. М.[1], Мальков В. С.[2], Строкова В. В.[3]

[1]САФУ им. М.В. Ломоносова
[2]ТГУ
[3]БГТУ им. В.Г. Шухова

Эл. почта: yu.sokolova@narfu.ru

Под алюмосиликатными коллоидно-дисперсными системами понимаются песчано-глинистые грунты, представляющие собой механическую смесь распространенных минералов земной коры – алюмосиликатов и характеризующиеся большой изменчивостью свойств под действием природно-климатических и техногенных факторов [1]. Поэтому одной из актуальных задач является стабилизация песчано-глинистых грунтов путем создания структуры с заданными физико-механическими характеристиками.

Предварительные исследования, представленные в работах [2, 3], показали возможность использования органоминеральной добавки на основе глиоксаля для инъекцион-

ного закрепления грунтов в основаниях дорог и инженерных коммуникаций. Так, модификация песчаного грунта органоминеральной добавкой повышает его удельное сцепление в 50 раз. Данный эффект связан с усилением дисперсионного взаимодействия между частицами грунта за счет синтеза уплотняющей прослойки из органического полимера. Однако образующаяся периодическая коллоидная структура (ПКС) не устойчива к внешним температурно-влажностным воздействиям.

Вместе с тем известно, что при взаимодействии органических веществ, содержащих в своем строении фенольные гидроксильные группы, с глиоксалем образуется химические соединения по типу тетрафенола, устойчивые к действию воды [4-6]. Наиболее распространенным полимером растительного происхождения, характеризующимся высоким содержанием фенольных гидроксильных групп (2-4,5%), является лигнин [7]. Лигнин прочно физически и химически инкорпорирован в структуре растительной ткани, и эффективное выделение его промышленными методами представляет сложную инженерную задачу. Однако в лабораторно-исследовательской практике методы выделения нативного лигнина основаны на стадии активации растительного сырья путем его механического помола. Следует отметить, что более 35 млн. $м^3$ древесных отходов ежегодно образуется на предприятиях деревообрабатывающей промышленности России. Одним из таких отходов является кора. Доля коры, содержание лигнина в которой достигает 44% [8], составляет в среднем 6-25% от объема древесного ствола [9]. Поэтому целью исследования являлась оценка возможности получения производных глиоксаля путем его химического взаимодействия с лигнинными веществами коры без их предварительного выделения и апробация данных структур для стабилизации алюмосиликатных коллоидно-дисперсных систем. Предварительно кора сосны обыкновенной была доведена до постоянной массы при температуре 40°С. Для активации поверхностных центров лигнина было произведено механическое диспергирование коры на планетарной шаровой мельнице в течение 10 минут. Средний размер частиц коры составил 3 мкм; удельная площадь поверхности – 1630 $м^2$/кг.

Для идентификации продуктов полимеризации в системе кора-глиоксаль были записаны ИК-спектры коры, лигнина (хвойный лигнин Бьеркмана) и композиций кора-глиоксаль и лигнин-глиоксаль. Количество глиоксаля было принято, исходя из гипотезы: одна молекула глиоксаля связывает две фенольные гидроксильные группы лигнина. Идентификация спектров показала, что характеристические полосы для композиций лигнин-глиоксаль и кора-глиоксаль практически совпадают и существенно отличаются от спектра лигнина в области 500-1500 $см^{-1}$ [10], что может служить подтверждением образования продуктов взаимодействия лигнинных веществ коры с глиоксалем.

Для исследования устойчивости алюмосиликатной структуры, обработанной модификатором на основе коры и глиоксаля, к внешним воздействиям была определена прочность на сжатие образцов песчаного грунта с органоминеральной добавкой на основе глиоксаля (контрольный образец) и его производных (опытный образец) до и после водонасыщения. Полученные результаты показали, что прочность контрольного и опытного образцов до воздействия влаги практически одинаковая и составляет в среднем 6

МПа. Однако после водонасыщения прочность контрольного образца снижается в 50 раз, а опытного всего в 4 раза, что подтверждает образование устойчивой ПКС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-33-50028.

Список литературы

1. Лукина В.А., Лукин А.Ю., Временное ограничение движения транспортных средств по автомобильным дорогам Архангельской области, Промышленное и гражданское строительство, №10, С. 44-46, 2012;
2. Gayda J., Ayzenshtadt A., Tutygin A., Frolova M., Organic-Mineral Aggregate for Sandy Subsoil Strengthening, Procedia Engineering, 143, P. 90-97, 2016;
3. Sokolova Y., Ayzenshtadt A., Tutygin A., Frolova M., Structural features of aluminum silicate soils stabilized by the organic additive, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 17 (12), P. 801-808, 2017;
4. Younesi-Kordkheili H., Kazemi-Najafi S., Behrooz Eshkiki R., Pizzi A., Improving urea formaldehyde resin properties by glyoxalated soda bagasse lignin, Eur. J. Wood Prod., 73, P. 77-85, 2015;
5. Younesi-Kordkheili H., Improving physical and mechanical properties of new lignin-urea-glyoxal resin by nanoclay, Eur. J. Wood Prod, 75 (6), P. 885-891, 2017;
6. Водянкина О.В., Курина Л.Н., Петров Л.А., Князев А.С., Глиоксаль, Мин-во образования и науки РФ. Томский гос. ун-т, Academia, 248 с., 2007;
7. El Mansouri NE., Salvad´o J., Structural characterization of technical lignins for the production of adhesives: Application to lignosulfonate, kraft, soda-anthraquinone, organosolv and ethanol process lignins, Industrial Crops and Products, 24, P. 8–16, 2006;
8. Кортаев Э.И., Симонов В.И., Производство строительных материалов из древесных отходов, Лесная промышленность, 144 с., 1972;
9. Волынский В., Биоэнергетика, Переработка и использование древесной коры, Леспроминформ, № 2 (84), С. 168-170, 2012;
10. Brown D.W., Floyd A.J., Sainsbury M., Organic Spectroscopy, J. Wiley, 250 p., 1988.

Влияние динамики линии контакта на колебания зажатого пузырька в неоднородном электрическом поле

Кашина М. А.[1], Алабужев А. А.[2]

[1]ПГНИУ
[2]ИМСС УрО РАН

Эл. почта: alabuzhev@mail.ru

Электросмачивание или использование электрических полей для улучшения свойств смачивания активно используется в технических приложениях. Явлению электросмачивания посвящено большое число работ (например, см. обзор [1]) и в последнее десятилетие эта тема активно развивается в рамках общего направления – микрофлюидики.

Изменение краевого угла в процессе электросмачивания обычно описывают уравнением Юнга-Липмана [1]. Однако это условие плохо описывает экспериментальные результаты и даже качественно не совпадает с данными экспериментов при больших напряжениях [1]. В работе [2] было предложено эффективное граничное условие, описывающее движение линии контакта под действием электрического поля: скорость движения контактной линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которых пропорциональная удвоенной частоте электрического поля. Таким образом, внешнее электрическое поле выступает в качестве вынуждающей силы действующей только на линию контакта трех сред. Данное условие основано на граничном условии Хокинга [3] и использовалось в работах [4-6] при изучении колебаний капли несжимаемой жидкости.

Исследовано поведение газового цилиндрического пузырька в неоднородном переменном электрическом поле. Пузырек окружен несжимаемой жидкостью и ограничен в осевом направлении двумя параллельными твердыми поверхностями. Предполагается, что скорость движения контактной линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которых пропорциональная удвоенной частоте электрического поля [2].

В переменном электрическом поле существуют «антирезонансные» частоты, как и при обычных механических колебаниях пузырька [7]. Однако, в случаи симметричного поля (возбуждаются четные моды), неподвижная точка на боковой поверхности наблюдается только вблизи частоты объемных колебаний. Для несжимаемой капли «антирезонансные» частоты наблюдаются для всех мод [8, 9]. Резонансная амплитуда на этой частоте имеет ярко выраженный характер по сравнению с остальными резонансами. Но с увеличением давления газа в пузырьке происходит сдвиг резонансной частоты и этот эффект исчезает. Отметим, что амплитуда объемных колебаний аналогичного пузырька в переменном поле давления растет с увеличением параметра давления газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 14-21-00090.

Список литературы

1. Mugele F., Baret J.-C., Electrowetting: from basics to applications, J. Phys.: Condens. Matter, V. 17, p. 705–774, 2005;
2. Alabuzhev A.A., Kashina M.A., The oscillations of cylindrical drop under the influence of a nonuniform alternating electric field, J. Phys.: Conf. Ser., V. 681, 012042, 2016;
3. Hocking L.M., The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary, J. Fluid Mech., V. 179, p. 253-266, 1987;
4. Alabuznev A.A. Influence of a surface plates inhomogeneity on a translation oscillations of a drop, J. Phys.: Conf. Ser., V. 894, 012002, 2017;
5. Alabuzhev A.A., Kashina M.A., The oscillations of oblate drop under the influence of a alternating electric field, J. Phys.: Conf. Ser., V. 929, 012107, 2017;
6. Alabuzhev A.A., Kashina M.A., The dynamics of oblate drop between heterogeneous plates under alternating electric field, Microgravity Sci. Technol., V. 30, p. 11-17, 2018;

7. Алабужев А.А. Поведение цилиндрического пузырька под действием вибраций, Вычислительная механика сплошных сред, Т.7, № 2, с. 151-161, 2014.;
8. Fayzrakhmanova I.S., Straube A.V.,Stick-slip dynamics of an oscillated sessile drop, Phys. Fluids, V. 21, 072104, 2009;
9. Алабужев А.А., Осесимметричные колебания цилиндрической капли с подвижной контактной линией, ПМТФ, Т. 57, № 6, с. 53-63, 2016.

Микрофлюидные устройства для петлевой изотермической амплификации

Тупик А. Н.[1], Посмитная Я. С.[1,2], Рудницкая Г. Е.[1], Евстрапов А. А.[1,2]

[1]ИАП РАН
[2]ИТМО

Эл. почта: tunix@yandex.ru

В медицинской диагностике, экологическом мониторинге и контроле качества продуктов питания востребованы методы амплификации нуклеиновых кислот на основе полимеразной цепной реакции (ПЦР). Петлевая изотермическая реакция (LAMP) является альтернативой ПЦР, обеспечивает высокую эффективность амплификации ДНК и имеет преимущества в простоте реализации, высокой скорости амплификации, не требует высокоскоростных и прецизионных нагревательных устройств. Поэтому LAMP является подходящим методом для проведения экспресс-анализа на месте происшествия с минимальным оборудованием.

Высокопроизводительные методы амплификации наиболее выгодно реализовать в микромасштабе с применением микрочиповых технологий, в частности, основанных на принципах капельной микрофлюидики. В капельной (эмульсионной) микрофлюдике для решения ряда задач реализуется концепция разделения анализируемой пробы на множество отдельных независимых объемов, каждый из которых содержит все необходимые компоненты реакции и представляет собой изолированную реакционную камеру. Ключевыми моментами капельной микрофлюидики являются выбор конструкции микрофлюидного устройства с генератором капель, подбор поверхностно-активных веществ (ПАВ) и состава непрерывной фазы, оптимизация режимов и условий для получения множества капель с воспроизводимыми характеристиками. Правильный выбор ПАВ способствует термостабильности капель при амплификации, но при этом следует также учитывать возможное влияние этих веществ на ферментативную реакцию.

В работе представлены результаты исследований по изучению возможности постановки изотермической амплификации на микрочиповых устройствах, изготовленных методом "мягкой" литографии по стандартному протоколу. Для изотермической амплификации использованы два варианта микрофлюидных чипов: а) с генератором капель на основе принципа "фокусировки потока"; б) со стационарной реакционной камерой для детектирования результатов амплификации (регистрации флуоресценции).

Обсуждаются условия и режимы воспроизводимого формирования капель заданного объема. Для апробации микрочипов в качестве тест-системы использована ДНК-мишень вируса мешотчатого расплода пчел и реакционная смесь с интеркалирующим красителем EVAGreen. Регистрация размеров капель и результатов амплификации осуществлена методами оптической флуоресцентной микроскопии. Показано, что полученные результаты могут быть основой для создания высокопроизводительных систем для проведения "цифровой" амплификации на микрофлюидных устройствах и устройств для экспресс-диагностики.

Математическое моделирование систем диагностики поверхности на основе полевой эмиссии

Луньковский М. Н.[1], Никифоров К. А.[1]

[1]СПБГУ

Эл. почта: nikiforov_k@rambler.ru

Работа представляет результаты многомасштабного моделирования характеристик поверхности острия полевого электронного эмиттера. Объектом изучения является монокристалл металлического полевого электронного эмиттера острийной формы, который обычно изготавливается из металлической проволоки диаметром около 0.1−0.15 мм методом электрохимического травления. Радиус кривизны при вершине эмиттера находится в диапазоне 10-1000 нм. Рассчитана кристаллографическая структура поверхности и получены индексы Миллера основных (наиболее развитых) кристаллографических графней, представленных на поверхности. На микромасштабе получена аппроксимация формы острия мнокристалла эмиттера. На мезомасштабе вычислены кристаллографические грани на поверхности и использована полуэмпирическая регрессионная модель для построения значений работы выхода, распределение которой по поверхности неоднородно в соответствии с координатами атомов поверхности и плотности упаковки, вычисленных на наномастабном уровне рассмотрения задачи (базовом уровне атомистического моделирования). Получено распределение напряженности электрического поля на каждом уровне детализации и определено поле пятен — возмущения локального электрического поля на поверхности эмиттера из-за контактной разности потенциалов между участками поверхности с различными значениями работы выхода. Полученные результаты важны для анализа точности систем диагностики поверхности, в которых распределение работы выхода и локального электрического поля имеют большое значение: атомная зондовая томография, полевая ионная/электронная микроскопия и полевая десорбционная микроскопия.

Список литературы

1. Nikiforov K. A., Egorov N. V., Lunkovskiy M. N. Modelling of field emitter surface structure, Journal of Physics: Conference Series. IOP, vol. 643, 012010, 2015;
2. Nikiforov K. A., Lunkovskiy M. N. Algorithm for computation of coordinates of atoms on field emitter tip surface, 2016 Young Researchers in Vacuum Micro/Nano Electronics, Piscataway: IEEE, 7880413, 2016.

Приборы и материалы ТГц и СВЧ диапазона

Уменьшение сдвига частоты центрального резонанса квантового стандарта частоты на атомах цезия-133

Петров А. А.[1], Давыдов В. В.[1], Лукашев Н. А., Валов А. П.[2]

[1]СПбПУ
[2]СПбГУТ

Эл. почта: Alexandrpetrov.spb@yandex.ru

В условиях постоянного развития методов мировой науки, технологии и экономики необходимо постоянное совершенствование методов точных измерений времени и частоты для решения новых возникающих задач. Необходимо также отметить, что без измерения времени с высокой точностью невозможна надежная работа навигационных приборов, радиоэлектронной аппаратуры и телекоммуникационного оборудования, компьютерных и сотовых сетей [1-3].

Необходимым условием слаженной работы различного оборудования, как в инфокоммуникационных сетях, так и в глобальных системах спутниковой навигации, является наличие стабильных источников опорных колебаний. Наибольшей точностью и надежностью среди источников опорных колебаний, используемых для измерения частоты и времени, в настоящее время обладают квантовые стандарты частоты (КСЧ).

С развитием научно – технического прогресса постоянно меняются условия эксплуатации КСЧ, которые определяют новые требования по точности измерений, надежности работы и массо – габаритным характеристикам стандартов.

Среди всех моделей КСЧ — цезиевые занимают особое место, поскольку эталон времени базируется на микроволновом переходе в атоме цезия-133. Кроме обширного наземного применения, КСЧ на атомах цезия активно используются в спутниковых навигационных системах.

Использование цезиевых КСЧ в спутниковых навигационных системах, в первую очередь, обусловлено их высокой долговременной стабильностью частоты выходного сигнала на уровне $(1\text{-}3)\cdot 10^{-14}$ за время наблюдения 1 сутки.

Для улучшения выше указанной характеристики, в том числе и на более длительных временах наблюдения, необходимо минимизировать сдвиги частоты эталонного перехода, проявляющиеся в течение срока эксплуатации изделия.

Сдвиги эталонного атомного перехода могут порождаться флуктуациями внутренних параметров квантового дискриминатора, флуктуациями параметров узлов и блоков,

принимающих участие в формировании сигнала СВЧ возбуждения или флуктуациями источника тока, создающего постоянное магнитное поле в атомно-лучевой трубке (АЛТ) КСЧ.

В нашей работе основное внимание уделено сдвигам частоты эталонного перехода, возникающих в результате недостаточного подавления боковых амплитудных составляющих в спектре выходного сигнала синтезатора частоты (СЧ), а также за счет изменения величины магнитного поля.

По причине изменения во времени величины магнитного поля эталонный переход испытывает квадратичный сдвиг частоты. Кроме этого, частотный сдвиг испытывает не только центральный, но и все остальные 6 переходов между двумя сверхтонкими подуровнями атомов цезия. Эти сдвиги влияют на точность выходного сигнала стандарта частоты и непосредственно на его метрологические характеристики.

В теории их можно учесть при расчете функциональной зависимости от значения магнитного поля и атомных констант с помощью уравнения Брайта-Раби [1]. Но на практике при любых изменениях магнитного поля происходят сдвиги частот резонансов, значения которых невозможно учесть заранее. Проведенные предварительные эксперименты, а также теоретические расчеты функциональной зависимости сдвигов частоты позволили нам разработать схему стабилизации магнитного поля, позволяющую устранить один из важных возмущающих факторов, влияющих на долговременную стабильность частоты КСЧ. В результате работы новой системы стабилизации магнитного поля исключаются эффекты, связанные с изменениями магнитного поля (например, долговременный дрейф источника тока, температурная зависимость, влияние внешнего магнитного поля и т.д.).

По результатам предварительных исследований работы КСЧ с разработанной нами системой стабилизации магнитного поля было установлено улучшение долговременной стабильности частоты КСЧ на 10%.

Список литературы

1. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения – М.: Физматлит, 2009;
2. Petrov A.A., Vologdin V.A., Davydov V.V., Zalyotov D.V. Dependence of microwave – excitation signal parameters on frequency stability caesium atomic clock. Journal of Physics: Conference Series. 2015. volume 643 (1). P. 012087;
3. Petrov A. A., Davydov V. V. New microwave excitation signal generating circuit for quantum frequency standard on the atoms of caesium Cs133. International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2016. Vol. 41. P. 1660142.

Моделирование формирования и пространства взаимодействия ленточных электронных пучков в усилителях терагерцевого диапазона

Данилушкин А. В.[1], Бурцев А. А.[1], Навроцкий И. А.[1]

[1]СГТУ

Эл. почта: dan-aleksei2012@yandex.ru

Компактные усилители средней мощности диапазона частот 0.2-0.3 ТГц могут быть реализованы на основе миниатюрных аналогов электровакуумных приборов, таких как ЛБВ, где используются ленточные электронные пучки [1-2]. Одной из основных проблем при разработке вакуумных приборов терагерцевого диапазона является необходимость использования в узких пролетных каналах замедляющих систем электронные пучки с высокой плотностью тока, что является трудно осуществимым для современных катодов. Поэтому перспективны те электронно-оптические системы (ЭОС), в которых используются сходящиеся ленточные пучки, позволяющие получить достаточно большие плотности тока при меньшей токовой нагрузке на катод и с меньшим значением магнитного поля. В данной работе предложена и реализована методика численного моделирования формирования ленточных электронных пучков и пространства взаимодействия. Приведены результаты расчета методом синтеза [3-4] ЭОС формирования ленточного пучка толщиной 0.05 мм, током 200 мА при ускоряющем напряжении 20 кВ. Рассчитанная пушка была проверена в программе анализа Lorentz-3EM, при этом конфигурация электродов задавалась с учетом конструкторско-технологических требований. Были получены сечения электронного пучка в пролетном канале при транспортировке в магнитном поле 0.7 Тл, из которых можно сделать вывод о стопроцентном токопрохождении электронного пучка на длину 30 мм. Приведены результаты расчета взаимодействия ленточного электронного пучка в режиме большого сигнала [5]. Проведены расчеты коэффициента усиления, КПД и выходной мощности в полосе частот 0.2-0.3 ТГц. Для экспериментальных исследований ЭОС формирования ленточного потока был изготовлен прессованный импрегнированный плоский катод и фокусирующая сетка. В ходе исследований ВАХ электронной пушки в вакуумном разборном макете использовался подвижной коллектор. Макет электронной пушки, формирующий ленточный пучок, состоял из катодно-подогревательного узла, фокусирующей сетки и коллектора с диафрагмой 0,01 мм. В результате экспериментальных исследований ВАХ электронной пушки в импульсном режиме при рабочей температуре катода 1200^0С получен ток на коллекторе 200 мА, при этом измеренная толщина пучка в кроссовере пушки составила порядка 70 мкм.

Список литературы

1. A.A. Burtsev, Y.A. Grigor’ev, I.A. Navrotsky, V.I. Rogovin, G.V. Sakhadzhi, K.V. Shumikhin // Technical Physics Letters. Vol. 42. № 5. (543, 2016);
2. Yuan Zheng, Diana Gamzina, Branko Popovic, Neville C. Luhmann // IEEE Trans. El. Dev. Vol. 63, Issue: 11, (4466 2016);

3. В.Т. Овчаров // Радиотехника и электроника. Т.7 №8 (1367, 1962);
4. Y. G. Gamayunov; E. V. Patrusheva; Y. A. Grigoriev; A. A. Burtsev; A. V. Danilushkin Synthesis of compressed sheet field-emission flows for terahertz TWT IVEC 2017 DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289542;
5. T. A. Karetnikova, A. G. Rozhnev, N. M. Ryskin, G. V. Torgashov, N. I. Sinitsyn, Yu. A. Grigoriev, A. A. Burtsev, and P. D. Shalaev Modeling a subterahertz traveling-wave tube with a slow-wave structure of the double grating type and a sheet electron beam J. Commun. Technol. Electron. 61 (2016), 50.

Спин-волновой согласованный фильтр для сигналов с амплитудной модуляцией

Мартынов М. И.[1], Никитин А. А.[1], Семенов А. А.[1], Калиникос Б. А.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: nitrogeniumfirst@gmail.com

На сегодняшний день повсеместно используются ферритовые фазовращатели и фильтры [1]. Высокие показатели времени задержки и дисперсионные свойства ферритовых приборов обеспечивают их широкое применение в СВЧ электронике [2]. В частности, применяются цепи с положительной обратной связью для создания генераторов с низким уровнем фазовых шумов, в которых частотозадающим элементом являются линии задержки [3]. Такие цепи можно рассматривать как линейные фильтры с гребенчатой АЧХ в виду их резонансных свойств [4]. Каждая полоса пропускания может иметь добротность более десятка тысяч и линейную внутриполосовую фазовую характеристику. Набор таких полос позволяет сравнивать АЧХ с вещественной частью спектра сигнала, содержащего амплитудную модуляцию (АМ) (манипуляцию).

В работе исследован согласованный фильтр построенный по схеме активного кольцевого резонатора с применением ферритовой линии задержки (ЛЗ) [5]. В качестве линии использовалась эпитаксиальная пленка железо-иттриевого граната с двумя короткозамкнутыми микрополосковыми антеннами типа "меандр". Для компенсации потерь был использован широкополосный усилитель в комбинации с переменным аттенюатором. Ввод и вывод сигнала обеспечивали два направленных ответвителя. В исследуемой схеме резонансные частоты определятся временем задержки сигнала, что обеспечивает АЧХ в виде набора полос пропускания. Форма полос определяется затуханием спиновых волн и АЧХ возбуждающих антенн, что позволяет подбирать конфигруцию под необходимые параметры входного сигнала.

Выбор параметров также зависит от типа входного сигнала. Для периодических сигналов с АМ основными параметрами являются частота модуляции (период) и скважность. Период сигнала определяет требования к расстоянию между полосами пропускания и потерям. Другими словами — фильтрация будет согласованной в случае, если период сигнала равен групповому времени задержки в кольцевой схеме на несущей часто-

те. Общая ширина спектра резонансных частот может быть определена скважностью сигнала, которая определяет огибающую амплитудного спектра сигнала. При скважности до 2, основная часть спектра сосредоточена около несущей, что позволяет использовать меньшую ширину полосы пропускания ЛЗ.

В работе рассмотрено согласование между АЧХ и последовательностью из 10 прямоугольных импульсов со скважностью 2 и периодом 150 нс. Для образования междуполосного расстояния в 10 МГЦ были использованы следующие параметры цепи:

- толщина пленки ЖИГ — 15 мкм;
- намагниченность насыщения — 1680 Гс;
- величина поля подмагничивания — 1160 Э;
- расстояние между антеннами типа "меандр" — 6 мм;
- ширина микрополосковой линии 50 мкм и ширина меандра 250 мкм.

Данная конфигурация позволяет захватить до 6 гармоник центрального лепестка спектра сигнала на несущей частоте 5,27-5,29 ГГц за счет многополосности АЧХ. Помимо этого, магнитная перестройка обеспечивает широкий диапазон захвата центрального лепестка при отстройке несущей. В качестве шумовой составляющей были использованы белый шум и периодические помехи. Было определено, что на фоне белого шума фильтрация происходит эффективно до значений сигнал/шум — 15 дБ и на фоне периодических помех до -22 дБ. Показано, что способность к фильтрации зависит от соотнесения полос пропускания к спектру входного сигнала.

Список литературы

1. Гуляев Ю.В, Зильберман П.Е., Спинволновая электроника, «Знание», № 6, 24 с., 1988;
2. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П., Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот, Изд-во СГУ, 312 с., 1992;
3. Eliyahu D., Maleki L., Tunable, Ultra-Low Phase Noise YIG Based Opto-Electronic Oscillator, IEEE, 2003 IEEE MTT-S International, 2185-2187, 2003;
4. Порохнюк А.А., Устинов А.Б., Ковшиков Н.Г., Калиникос Б.А., Исследование оптимальной фильтрации СВЧ-сигнала многополосным спин-волновым кольцевым резонатором, Письма в ЖТФ, том 35, вып. 18, с. 17-27, 2009;
5. Demidov V.E., Kalinikos B.A., Kovshikov N.G. and Edenhofer P., Active narrow-band magnetostatic wave filter, Electronics letters, Vol. 35, No. 21, 1856-1857, 1999.

Компрессия плотных электронных сгустков собственными полями

Опарина Ю. С.[1], Савилов А. В.[1], Бандуркин И. В.[1]

[1]ИПФ РАН

Эл. почта: yuliaoparina1993@yandex.ru

Современные фотоинжекторы обеспечивают формирование плотных сгустков пикосекундной длительности с зарядами в сгустке до 1 нанокулона, что соответствует килоамперным токам, и с энергиями частиц на уровне 3-7 МэВ. Получение ультракоротких (с длительностью от долей пикосекунды и вплоть до фемтосекундных импульсов) плотных электронных сгустков является в настоящее время задачей, востребованной рядом важных физических приложений, включая запитку такими сгустками современных высокоградиентных плазменных ускорителей, использование этих сгустков в физикохимических исследованиях (ультрабыстрые процессы рассеяния и дифракции электронов в веществе), использование плотных электронных сгустков в лазерах на свободных электронах, а также генерация мощного когерентного терагерцового излучения.

Данная работа посвящена исследованию физических механизмов самокомпрессии плотных умеренно-релятивистских электронных сгустков их собственными электромагнитными полями (квазистатическими кулоновскими электрическими полями и полями излучения).

Компрессия спонтанным ондуляторным излучением реализуется, когда сгусток движется в ондуляторе и излучает волну, длина которой превосходит продольный масштаб сгустка (режим спонтанного излучения). В случае группового резонанса, когда поступательная скорость электронов равна групповой скорости волны, это соответствует режиму сверхизлучения. В такой ситуации электронный сгусток оказывается между максимумом тормозящей фазы волны и ее «нулем». Таким образом, частицы, летящие впереди, тормозятся сильнее, и пучок сжимается к краю, находящемуся вблизи нейтральной фазы.

Компрессия в режиме мазера на циклотронном резонансе (МЦР) имеет существенные отличия от режима ЛСЭ вследствие отрицательного знака фактора инерционной группировки. Фактически, реализуется режим отрицательной массы, в котором уменьшение энергии частиц приводит к росту поступательной скорости. В результате, в отличие от случая ЛСЭ, в режиме точного группового резонанса сгусток будет не компрессироваться, а растягиваться полями излучения. Эта проблема решается отходом от режима точного группового резонанса, что приводит к смещению сгустка в «правильную» (с точки зрения компрессии) фазу.

Компрессия спонтанным ондуляторным излучением в режиме отрицательной массы может быть реализована при движении электронов в ондуляторе с ведущим магнитным полем. В таком режиме кулоновское отталкивание сменяется притяжением, а наличие поля излучения (при «правильной» его фазе относительно сгустка) обеспечивает значительное улучшение компрессии. Согласно расчетам, при таком подходе для плотных

электронных сгустков (заряд ~ 1 нК, длительность ~ нескольких пс) можно обеспечить факторы компрессии на уровне одного-двух порядков.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований 16-02-00794, 18-02-00765.

Список литературы

1. I.V. Bandurkin, Yu.S. Oparina and A.V. Savilov, Super-radiative self-compression of photo-injector electron bunches, Applied Physics Letters 110, 263508 (2017);
2. http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4990972;
3. I.V. Bandurkin, V.L. Bratman, I.S. Kurakin, Yu.S. Oparina, A.V. Savilov, N. Balal, Yu. Lurie, THz undulator radiation of dense electron bunches stabilized in the negative mass regime. Proc. of IVEC 2017, 18th International Vacuum Electronics Conference (London, United Kingdom, 24-26 April 2017). 2 pages;
4. https://www.eventure-online.com/eventure/public/publicAbstractView.form?id=325990&congressId=11933&from=session&fromId=355807;
5. A. V. Savilov, I. V. Bandurkin, V. L. Bratman, I.S. Kurakin, Yu.S. Oparina, N. Balal, and Yu. Lurie. Axial and Phase Stabilization of Short Dense Photo-Injector Electron Bunches as a Way for Spontaneous Coherent THz Emission from These Bunches. Workshop booklet of Abstracts, Terahertz science at European XFEL. 01–02 June 2017, European XFEL, Schenefeld, Germany, page 20;
6. https://indico.desy.de/getFile.py/access?resId=1&materialId=paper&confId=16848;
7. Yu.S. Oparina, A.V. Savilov, Spontaneous coherent cyclotron THz super-radiation from a short dense photo-injector electron bunch, EPJ Web of Conferences, 149, статья 05019, (2017);
8. https://www.epjconferences.org/articles/epjconf/abs/2017/18/epjconf_smp2017_05019/epjconf_smp2017_05019.html;
9. A.V. Savilov, I.V. Bandurkin, Yu.S. Oparina, Super-radiative self-compression of photo-injector electron bunches and the use of this effect for realization of a THz source based on spontaneous coherent emission from a short dense electron bunch, EPJ Web of Conferences, 149, статья 05008, (2017);
10. https://www.epjconferences.org/articles/epjconf/abs/2017/18/epjconf_smp2017_05008/epjconf_smp2017_05008.html.

Анализ дифференциальных параметров вакуумных микротриодов в статическом режиме

Соколов И. А.[1], Стребко В. А. [1], Никифоров К. А.[1]

[1]СПбГУ

Эл. почта: t.i.derzhavina@inbox.ru

Развитие элементной базы вакуумной микро- и наноэлектроники требует изучения различных автоэмиссионных триодных структур, которые обладают выжными преимуществами по сравнению с термоэлектронными системами: мгновенный запуск элек-

тронных устройств в рабочий режим и отсутствие необходимости обогрева эмиттера, открывающее большие перспективы миниатюризации. Данное развитие требует также решения целого ряда проблем различного характера: технологические проблемы – воспроизводимость критичных геометрических размеров; технические проблемы – высокий вакуум; физические проблемы – разрушение верхушки катода в результате эрозии и само диффузии атомов при малых радиусах кривизны; электротехнические проблемы – высокие управляющие напряжения (десятки и сотни Вольт) и низкий рабочий ток (менее 1мкА/катод). Поэтому возникают сложности при создании массивов триодов с автоэмиссионными катодами: обеспечение необходимого уровня тока эмиссии для эффективной работы электронных приборов; обеспечение надежной и долговременной работы эмиттеров; обеспечение формирования электронного пучка с оптимальной геометрией и параметрами; создание технологии изготовления и сборки микро- и наноразмерных эмиттеров. Одновременно с указанными сложностями, которые накладывают ограничения на выбор той или иной структуры, большое значение имеют характеристики триодных систем во внешней электрической цепи.

В данном исследовании проводится сравнительный анализ различных автоэмиссионных триодных микро- и наноструктур, основанный на изучении дифференциальных параметров их работы в статическом режиме, измеренных как по экспериментальным данным, так и по результатам моделирования. Показано, что триодные структуры обладают дифференциальными параметрами, которые значительно (на порядки) отличаются от аналогичных характеристик обычных электронных ламп, что вместе с миниатюризацией значительно расширяет возможности использования.

Список литературы

1. Егоров Н.В., Шешин Е.П., Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. ИД Интеллект, 2011;
2. Nikiforov K.A., Mathematical model and software complex for computer simulation of field emission electron sources, AIP Conference Proceedings, 1648, 450014, 2015;
3. Nikiforov K.A., Egorov N.V., Saifullin M.F., Mathematical simulation of a diode system with a field-emission matrix cathode, Technical Physics, 60, 11,1626-1631, 2015.

Интерферометр Маха-Цендера на основе тонкопленочных мультиферродных структур

Никитин А. А.[1], Никитин Ан. А.[1], Устинов А. Б.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: aleksei.a.nikitin@gmail.com

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к изучению перестраиваемых логических элементов для их применения в современных информационных и телекоммуникационных системах. Существуют различные способы реализации таких элемен-

тов, включающие использование комплементарной металл-оксид-полупроводникой (КМОП) структуры [1], а также оптических [2], молекулярных [3] и магнонных [4] структур. Последний способ недавно стал активно рассматриваться в качестве замены стандартной КМОП технологии вследствие более эффективного механизма обработки информации [5] — [7]. Принцип работы магнонных логических элементов заключается в том, что квант спиновой волны выполняет функции заряда в традиционной электронике [5], [8]. Такой подход позволяет передавать и обрабатывать информацию с учетом особенностей спин-волновых явлений. К существующим недостаткам магнонных логических элементов, препятствующим их широкому распространению в современной микроэлектронике, можно отнести размеры и недостаточно эффективное энергопотребление устройств на их основе. Для устранения перечисленных недостатков мы предлагаем новую конструкцию миниатюрного перестраиваемого интерферометра Маха-Цендера на основе тонкопленочной структуры феррит-сегнетоэлектрик-феррит.

Предложенный интерферометр Маха-Цендера состоит из двух плечей, в первом плече которого находится перестраиваемый фазовращатель, а во втором плече – аттенюатор. Фазовращатель основан на многослойной структуре, состоящей из двух слоев феррита, разделенных тонкой сегнетоэлектрической пленкой. В качестве ферритовых волноводов были выбраны пленки железо-иттриевого граната толщиной 6 мкм и 20 мкм и намагниченностью насыщения 1713 Гс и 1750 Гс, соответственно. Внешнее магнитное поле, равное 1500 Э, было направлено перпендикулярно направлению распространения рабочих волн и касательно к плоскости пленке, что соответствовало случаю поверхностных спиновых волн. В качестве сегнетоэлектрика была выбрана пленка титаната бария-стронция $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ толщиной 1 мкм и диэлектрической проницаемостью 1500 при нулевом электрическом поле смещения. В ходе проведенного исследования было продемонстрировано, что передаточная характеристика исследуемого интерферометра длиной 1 мм состоит из полос пропускания и заграждения. К примеру, в отсутствии напряжения частота 6.1521 ГГц соответствует полосе пропускания интерферометра. Приложение управляющего напряжения к тонким электродинамически-прозрачным металлическим электродам, расположенным на обеих поверхностях сегнетоэлектрической пленки, приводит к изменению фазового набега СВЧ-сигнала в первом плече интерферометра, а, следовательно, к перестройке его передаточной характеристики. Так, приложение напряжения 6,57 В обеспечивает фазовый сдвиг π радиан на частоте 6.1521 ГГц, в следствие чего на этой частоте выполняется условие противофазной интерференции, что соответствует полосе заграждения. Таким образом, использование тонкопленочных структур феррит-сегнетоэлектрик-феррит приводит не только к миниатюризации интерферометра Маха-Цендера, но и позволяет снизить управляющее напряжение, необходимое для изменения его состояния.

Список литературы

1. Q. Xu and R. Soref, “Reconfigurable optical directed-logic circuits using microresonator-based optical switches,” Optics Express, vol. 19, iss. 6, pp. 5244-5259, 2011;
2. Q. Xu and R. Soref, “Reconfigurable optical directed-logic circuits using microresonator-based optical switches,” Optics Express, vol. 19, iss. 6, pp. 5244-5259, 2011;

3. H. Sun, J. Ren, and X. Qu. "Carbon nanomaterials and DNA: From molecular recognition to applications." Accounts of chemical research, vol. 49, iss. 3, pp. 461-470,2016;
4. A. Khitun, M. Bao, and K. L. Wang, “Magnonic logic circuits,” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 43, iss. 26, p. 264005, 2010;
5. A. Khitun, M. Bao, and K. L. Wang, "Spin wave magnetic nanofabric: A new approach to spin-based logic circuitry," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, iss. 9, pp. 2141-2152, 2008;
6. A. V. Chumak, A. A. Serga, and B. Hillebrands. "Magnon transistor for all-magnon data processing," Nature communications, vol. 5, p. 4700, 2014;
7. G. Csaba, A. Papp, and W. Porod. "Perspectives of using spin waves for computing and signal processing," Physics Letters A, vol. 381, iss. 17, p. 1471-1476, 2017;
8. Q. Wang et al., "Voltage-controlled nanoscale reconfigurable magnonic crystal," Physical Review B, vol. 95, iss. 13, p. 134433, 2017.

Исследование пространственно-периодических тонкопленочных мультиферроидных структур на основе копланарной линии передачи

Никитин А. А.[1], Устинов А. Б.[1], Никитин Ан. А.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: and.a.nikitin@gmail.com

Магнонные кристаллы представляют собой волноведущие структуры на основе магнитных материалов с пространственной периодической модуляцией их физических свойств или геометрии [1]. Недавние достижения в технологии тонких пленок привели к созданию искусственных многослойных мультифероридных структур, объединяющих преимущества ферритов и сегнетоэлектриков. Благодаря возможности двойного управления спектром волн в мультиферроиках, реализуемого за счет изменения как электрического, так и магнитного полей смещения, такие структуры широко используются в различных СВЧ-приборах [2]. К настоящему времени были предложены различные конструкции тонкопленочных феррит-сегнетоэлектрических структур на основе копланарных или щелевых линий передачи [3-5]. Однако исследованы СВЧ-свойства периодических мультиферроидные структур, основанных только на щелевой линии передачи. Данная работа направлена на теоретическое исследование новых тонкопленочных периодических феррит-сегнетоэлектрических структур на основе копланарной линии передачи. Исследуемый магнонный кристалл состоит из несколько слоев: сапфировой подложки толщиной 500 мкм и диэлектрической проницаемостью 10; пленки титаната бария стронция толщиной 2 мкм и диэлектрической проницаемостью 1500; копланарной линии передачи с шириной центрального электрода 50 мкм и переменной шириной зазора равной 25 и 75 мкм; пленки железо-иттриевого граната толщиной 10 мкм, диэлектрической проницаемостью 14 и намагниченностью насыщения 1750 Гс, сформированной на подложке гадолиний-галлиевого граната толщиной 500 мкм и диэлектрической проницае-

мостью 14. Магнитное поле напряженностью 1350 Э было направлено по касательной к плоскости структуры и по нормали к линии передачи. Дисперсионное соотношение электромагнитно-спиновых волн в исследуемой структуре было найдено с помощью аналитического решения системы уравнений Максвелла с использованием метода приближенных граничных условий, подробно описанного в работе [5]. Полученное дисперсионное соотношение использовалось для численного расчета передаточных характеристик магнонного кристалла с использованием метода матриц-передачи. На основании проведенного исследования было установлено, что периодическая модуляция ширины зазора копланарной линии передачи приводит к появлению запрещенных зон в спектре рабочих волн. На передаточной характеристике эти зоны проявляются в виде полос заграждения. В расчете длина периода составляла 1 мм, а их число было равно 10. Для приведенных параметров ширина первой полосы заграждения на частоте 5,86 ГГц составляла 24,6 МГц по уровню 3 дБ от максимального уровня потерь в 33 дБ. Кроме того, была достигнута эффективная электрическая перестройка передаточных характеристик магнонного кристалла при малом управляющем напряжении. В частности, приложение напряжения смещения, равного 150 В, к электродам копланарной линии приводило к сдвигу первой полосы заграждения на 10,4 МГц. Таким образом, предложенные магнонные кристаллы являются перспективными для разработки новых СВЧ-приборов и исследования новых физических явлений.

Список литературы

1. Chumak A. V., Serga A. A., Hillebrands B., Magnonic crystals for data processing, Journal of Physics D: Applied Physics, 50, 244001, 2017;
2. Vopson M. M., Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 40, 223-250, 2015;
3. Leach J. H., Liu H., Avrutin V., Rowe E., Özgür Ü., Morkoç H., Song Y.-Y., Wu M., Electrically and magnetically tunable phase shifters based on a barium strontium titanate-yttrium iron garnet layered structure, Journal of Applied Physics, 108, 064106, 2010;
4. Nikitin, A. A., Ustinov, A. B., Semenov, A. A., Kalinikos, B. A., Lähderanta, E., All-thin-film multilayered multiferroic structures with a slot-line for spin-electromagnetic wave devices, Applied Physics Letters, 104, 093513, 2014;
5. Nikitin, A. A., Ustinov, A. B., Vitko, V. V., Semenov, A. A., Belyavskiy, P. Y., Mironenko, I. G., Stashkevich A.A., Kalinikos B.A., Lähderanta, E., Dispersion characteristics of spin-electromagnetic waves in planar multiferroic structures, 118, 183901, 2015.

Влияние нейтронного облучения на состояние водорода в CVD алмазных пленках

Хомич А. А.[1], Деревяго А. Н.[2], Поклонская О. Н.[2], Хомич А. В.[1], Хмельницкий Р. А.[3], Поклонский Н. А.[2], Ральченко В. Г.[4]

[1]ИРЭ РАН
[2]БГУ
[3]ФИАН
[4]ИОФ РАН

Эл. почта: antares-610@yandex.ru

Водород играет ключевую роль в процессах химического газофазного (CVD) синтеза алмаза, обеспечивая селективное осаждение углерода в форме алмаза, является наряду с азотом основной технологической примесью в CVD алмазах и в значительной мере определяет свойства моно- и поликристаллических алмазных пленок (АП). В таких АП водород находится преимущественно на межкристаллитных границах и проявляется в инфракрасных (ИК) спектрах в виде полос поглощения в диапазоне 2800-3200 $см^{-1}$. Ионная имплантация – эффективный метод инженерии дефектов в алмазе. Исследования алмазов, имплантированных изотопами водорода, показали, что после отжига при 800-1100 °С в их спектрах электронного спинового резонанса наблюдается магнитный гистерезис, что свидетельствует об упорядочении электронных спинов [1], а после отжигов при 1600-1650 °С – серия узких (полуширина 3-6 $см^{-1}$) полос в спектрах фотолюминесценции, обусловленных водородсодержащими фотоактивными центрами [2].

Поликристаллические АП были синтезированы в СВЧ плазме из газовой фазы на установке ARDIS-100 [3] и облучены в ядерном реакторе ИВВ-2М [4] в потоке быстрых нейтронов интенсивностью $\approx 10^{14}$ $см^2 \cdot с^{-1}$ флюенсом 2×10^{19} $см^{-2}$. Измерения спектров ИК поглощения проводились спектрометром Perkin Elmer Spectrum 100 на полированных образцах. Отжиг АП проводился в вакууме в графитовой печи при температурах от 260 до 1700 °С в течение 1 часа при каждой температуре.

Показано, что высокодозовое облучение реакторными нейтронами, проникающими сквозь весь объем алмазных CVD образцов, не только создает высокую концентрацию собственных дефектов, но и существенно модифицирует межкристаллитные границы, смещая атомы водорода в объем алмазных кристаллитов. По данным ИК спектроскопии установлено, что величина смещения атомов водорода составляет ≈ 5 мкм и более. Проанализированы трансформации спектров ИК поглощения облученных реакторными нейтронами CVD алмазных пленок при вакуумных отжигах в диапазоне температур

вплоть до 1680°С. Установлено, что в спектрах ИК поглощения валентными колебаниями CHx-групп присутствует более пятнадцати относительно узких (полушириной 15-20 $см^{-1}$) полос, определены их спектральные положения и полуширины. Часть полос в ИК спектрах алмазов ранее не регистрировалась. На основании литературных данных и характера поведения полос при отжигах дана вероятная интерпретация структуры центров, ответственных за полосы поглощения в ИК спектрах АП, облученных быстрыми нейтронами. Обнаружено, что облучение быстрыми нейтронами существенно (на ~200°) повышает термостабильность образцов поликристаллических АП, определяющуюся процессами графитизации межкристаллитных границ за счет разрывов C-H_x–связей.

Работа выполнена при поддержке грантов 17-52-04085 РФФИ и Ф17РМ-091 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Khomich A.V., R.A. Khmelnitsky, Poklonski N.A., Lapchuk N.M., Khomich A.A., et al., Optical and paramagnetic properties of polycrystalline CVD-diamonds implanted with deuterium ions, Journal of Applied Spectroscopy, 79, 4, 600-609, 2012;
2. Khomich A.A., Ralchenko V.G., Khomich A.V., Vlasov I.I., Khmelnitsky R.A., Karkin A.E., Formation of new color centers in chemical vapor deposited diamonds, Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologia, 56, 5, 27-31, 2013;
3. Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Polskiy A.V., Konov V.I., Ashkinazi E.E., Khomich A.A., et al., Growth of single-crystal diamonds in microwave plasma, Plasma Physics Reports, 38, 13, 1113-1118, 2012;
4. Karkin A.E., Voronin V.I., Berger I.F., Kazantsev V.A., Ponosov Yu.S., Ralchenko V.G., et al., Neutron irradiation effects in chemical-vapor-deposited diamond, Phys. Rev. B, 78, 4, 033204, 2008.

Оптическая квантовая термометрия и магнитометрия, основанная на антипересечении и кросс релаксации спиновых центров окраски в карбиде кремния

Бреев И. Д.[1], Анисимов А. Н.[2], Солтамов В. А.[2], Баранов П. Г.[1,2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ

Эл. почта: animusin@yandex.ru

Одновременное обнаружение слабого изменения температуры и магнитного поля с использованием одного и того же датчика, позволяющего локально с высоким пространственным разрешением на уровне микро- и нанометров получать распределения полей и их градиентов является важнейшей проблемой в различных областях, начиная от фундаментальной физики и материаловедения до хранения данных и биомедицинской науки. Недавно были обнаружены вакансионные центры в карбиде кремния (далее спи-

новые центры) со свойствами, аналогичными свойствам NV-центров в алмазе [1]. У данных центров наблюдается физический эффект оптического выстраивания спинов спиновых центров окраски при возбуждении кристалла SiC в ближней инфракрасной области спектра 750-850 нм, что позволяет оптически регистрировать магнитный резонанс (ОДМР) и наблюдать кросс-релаксацию спиновых центров с их окружением в широком диапазоне температур, вплоть до температуры человеческого тела. Данные спиновые центры ориентированы вдоль гексагональной кристаллографической оси (с-оси) карбида кремния SiC, т. е. в отличие от ансамбля NV-центров в алмазе в SiC все центры уже самой природой выстроены вдоль одной оси [2].

Этот метод использует гигантский тепловой сдвиг расщепления нулевого поля для «темных» дефектов в трехмерном основном состоянии, не обнаруженном при связывании фотолюминесценции с соседними активными центрами яркости спина, и не требует полей радиочастот. Используя поперечную релаксацию уровня в основных состояниях активных «ярких» центров спина с S = 3/2 и «темными» спин-дефектами с S = 1 интегрированное магнитное поле и температурный датчик с разрешением субмикронного пространства могут быть реализованы с использованием того же спина система.

В работе наблюдается изменение интенсивности фотолюминесценции спиновых центров V2, V3, V4 [3] в кристалле 15R-SiC, лежащей в диапазоне 850-900 нм зависящей от внешнего магнитного поля, что характерно для сигналов антипересечения уровней (АПУ). Нами был обнаружен гигантский тепловой сдвиг кросс резонансного взаимодействия расщепления нулевого поля для «темных» дефектов в триплетном основном состоянии и проведена идентификация «темного» центра методом электронного спинового эха (ЭСЭ). По данным температурной зависимости кросс резонансного взаимодействия было также получено совпадение с результатами продемонстрированные в работе [4]. Насколько нам известно, нами впервые наблюдался эффект кросс резонанса на данном «темном» спиновом центре в SiC при комнатной температуре и нами была экспериментально установлена температурная зависимость «темного» центра при более высоких температурах, включая температуру человеческого тела. Идея квантовой термометрии состоит в том, чтобы использовать вариацию интенсивности ФЛ в окрестности CR, возникающую в зависимости от постоянного магнитного поля. Одновременно проходя через область нулевого магнитного поля на эффекте отсутствия зависимости АПУ от температуры становиться возможным измерить постоянное магнитное поле по относительному сдвигу линии основного состояния спиновых центров окраски в SiC.

Работа выполнена при поддержке РНФ №16-02-00877.

Список литературы

1. Gruber A., Drabenstedt A., Scanning Confocal Optical Microscopy and Magnetic Resonance on Single Defect Centers, Science vol. 276, 2012-2014, 1997;
2. Анисимов А.Н., Толмачев Д.О., Оптический квантовый магнитометр с субмикронным разрешением, основанный на явлении антипересечения уровней, Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 12, 2016;
3. Astakhov G.V., Simin D., Spin centres in SiC for quantum technologies, Applied Magnetic Resonance 47, 793–812, 2016;

4. Vainer V.S., V.A. Il'in Sov V.A., Electron spin resonance of exchange-coupled vacancy pairs in hexagonal silicon carbide, Phys. Solid State 23, 2126, 1981.

Определение параметров ловушек в сцинтилляционных гранатах по корреляции ТСЛ и вторичных компонент кинетики рентгенолюминесценции

Тухватулина Т. А.[1], Веневцев И. Д.[1], Михрин С. Б.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: ttansu96@gmail.com

Сцинтиллятор – это материал, который обладает способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения (ИИ). Полученную световую вспышку обычно регистрируют фотоэлектронным умножителем (ФЭУ).

В настоящее время в медицинской томографии большой интерес представляют сцинтилляторы на основе мультикомпонентных гранатов активированные ионами Ce^{3+}. Они обладают высоким световыходом до 60000 фотонов/МэВ и малым временем спада 50 нс [1].

К сцинтилляторам, применяемым в медицине, накладываются строгие требования к быстродействию. Необходимо низкое послесвечение и отсутствие вторичных компонент сцинтилляционной вспышки [2] Оба явления связаны с наличием дефектов в кристаллической решетке, которые могут являться ловушками носителей заряда. Послесвечение возникает из-за глубоких ловушек, а медленный спад сцинтилляционной вспышки из-за термического высвобождения носителей заряда из мелких ловушек.

В данной работе изучались кинетические параметры ловушки – E_t – термическая глубина залегания ловушки; s – частотный фактор; τ – время жизни носителей заряда на ловушках [3]. Для определения этих параметров были измерены кривые термостимулированной люминесценции (ТСЛ) и кинетики рентгенолюминесценции. Кривые ТСЛ измерялись при скорости нагрева 15 К/мин в диапазоне температур 80-500 К после облучения образца рентгеновскими лучами дозой в 75 мЗв. Кривые рентегенолюминесценции были измерены при комнатной температуре при длительности возбуждающего импульса 100 нс и 2 мкс (мощность дозы 70 мкЗв/мкс).

Объектами исследования являлись сцинтилляционные керамики мультикомпонентных гранатов следующей композиции: $(Lu,Gd,Y)_3(Al, Ga)_5O_{12}$: Ce^{3+}.

В ходе исследования была обнаружена корреляция ТСЛ в диапазоне 80-100 К со вторичными компонентами кинетики рентегнолюминесценции в диапазоне 1-10 мкс. Из полученных данных были определены параметры ловушек – E_t, s, τ. При этом одновременное рассмотрение ТСЛ и кривых послесвечения позволило более точно установить их значения по сравнению со стандартными методами обработки ТСЛ данных.

Список литературы

1. Cherepy, N.J., J.D. Kuntz, Z.M Seeley, S.E. Fisher, O.B. Drury, B.W. Sturm, T.A. Hurst, R.D. Sanner, J.J. Roberts and S.A. Payne, “Transparent ceramic scintillators for gamma spectroscopy and radiography,” in Proceedings of SPIE, 2010, 78050I;
2. C.W.E. van Eijk, Inorganic scintillators in medical imaging, Phys. Med.Biol. 47, 2002, R85;
3. F. Mott, R.W. Gurney, Electronic Processes in Ionic Crystals, 1940.

Теоретическое и экспериментальное определение концентрации дислокационных дефектов в титановом сплаве ВТ6 после холоднокатаной пластической деформации

Бабихина М. Н.[1], Лаптев Р. С.[1], Кудияров В. Н.[1]

[1]ТПУ

Эл. почта: m.babihina@mail.ru

Наличие дефектов в металлах и сплавах оказывает сильное негативное воздействия на их физико-химические и механические свойства. При изучении различного рода дефектов в основном используют теоретические расчеты, которые ограничены только изучением энергии их формирования и не рассматривают такие процессы как кинетика, механизмы формирования и эволюции. При этом для исследования данных явлений и процессов в дефектообразовании существует достаточно ограниченное количество методов. Однако наиболее эффективными и чувствительными методами идентификации разного рода дефектов являются методы позитронной спектроскопии. Данные методы позволяют определять не только тип и концентрацию дефектов, но и их химическое окружение. [1]

Однако, для получения количественной и качественной оценки количества дефектов методами позитронной спектроскопии необходима дополнительная информация о базовых дефектах и их влиянии на характеристики позитронной аннигиляции. В данной работе материалом для исследования был выбран титановый сплав марки ВТ6, так как данный материал нашел своё широкое применение в авиастроении, и изучение процесса формирования разного рода несовершенств кристаллической структуры в данном сплаве до сих пор остается актуальным. Также одним из сторонних методов оценки количества дефектов является рентгеноструктурный анализ кристаллической структуры.

В данной работе для создания преимущественно дислокационных дефектов был использован метод холоднокатаной пластической деформации. Для анализа дефектов применялись методы анализа временного распределения аннигиляции позитронов и совпадений доплеровского уширения аннигиляционной линии. Применяя данные методы, можно будет установить закономерности изменения аннигиляционных характеристик от плотности дислокаций, а также влияние примесей и легирующих элементов [1].

Принимая во внимание всё вышесказанное, целью данной работы является теоретическое и экспериментальное определение концентрации дислокационных дефектов в титановом сплаве ВТ6 после холоднокатаной пластической деформации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Исследование структуры и свойств титанового сплава ВТ6 в различных состояниях (исходное, после вакуумного отжига, с различной степенью деформации при прокатке);

2. Проведение расчетов плотности дислокаций с использованием результатов рентгеноструктурного анализа и ЭПА.

Список литературы

1. Лидер А.М. Позитронная спектроскопия для контроля микроструктурных изменений в системах «металл-водород» дисс. док.тех.наук. Томский политехнический университет, Томск, 2017.

Исследование анизотропии параметров тонкой структуры боратов $MeBO_3$ (Me = Fe, In, Ga)

Замковская А. И.[1], Максимова Е. М.[1], Наухацкий И. А.[1]

[1]КФУ им. В. И. Вернадского

Эл. почта: trabem.z@gmail.com

В данной работе были определены величины областей когеррентного рассеяния и микродеформаций кристаллов боратов, выращенных методом раствор-расплавной кристаллизации и изоструктурных кристаллам кальцита $CaCO_3$. Для порошков бората железа $FeBO_3$, бората галлия $GaBO_3$ и бората индия $InBO_3$ была установлена зависимость этих величин от направления, а для бората железа еще и от температуры в области от 25°C до 600°C.

Структурные исследования проводились на рентгеновских дифрактометрах SmartLab Rigaku и Дрон-3 в угловом диапазоне от 20° до 100° с использованием медного излучения. Определение параметров тонкой структуры осуществлялось методом анализа профиля дифракционных пиков, аппроксимированных функцией псевдо-Войта.

Результаты работы могут быть полезны при синтезе нанодисперсных порошков боратов.

Список литературы

1. Pérez S., Hilario D.G., Sans O., Ortiz J.A., Vegas H.M., Errandonea A., Ruiz-Fuertes D., Martínez- García J. et al, Compressibility systematics of calcite-type borates : An experimental and theoretical structural study on ABO3 (A = Al, Sc, Fe and In), Journal of Physical Chemistry, 2014;

2. Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А., Уманский Я.С., Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия, Металлургия, 632 стр, 1982.

Влияние нановключений на макроскопическую жесткость аморфных систем

Конюх Д. А.[1,2], Бельтюков Я. М.[1], Паршин Д. А.[2]

[1]ФТИ
[2]СПбПУ

Эл. почта: conyuh.dmitrij@yandex.ru

Физика наноструктур и композитов на их основе является одним из самых востребованных разделов современной теории конденсированных сред как с точки зрения теории, так и в различных прикладных областях. В настоящее время все более широкое применение находят полимерные нанокомпозитные материалы. Установлено, что внедрение в полимерную матрицу наночастиц в малых концентрациях может приводить к существенному изменению упругих свойств. Например, добавление 3–5% массовой доли наночастиц может увеличивать упругие модули нанокомпозита на 20–25% [1, 2].

Существенное влияние на макроскопическую жесткость аморфных систем может оказывать микроскопическая неаффиность смещений атомов при деформации системы [3]. Поскольку характерный масштаб неаффинных смещений оценивается десятками межатомных расстояний [4], то можно ожидать, что частицы нанометрового размера должны оказывать наиболее существенное влияние на макроскопическую жесткость аморфных и полимерных матриц. Согласно макроскопической теории упругости, добавлении твердых сферических включений с малой концентрацией n и радиусом R ведет к изменению модуля Юнга в виде:

$$\Delta E \sim nER^3, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга исходного вещества без включений. Однако при уменьшении радиуса таких включений все большую роль начинаю играть неаффинные деформации. Для изучения этого эффекта мы рассмотрели аморфное тело с помощью модели устойчивых случайных матриц [5]. Такая модель была с успехом применена для изучения распространения колебаний в различных аморфных системах. В данной модели динамическая матрица имеет вид $M = AA^T + \mu M_0$. Здесь случайная квадратная матрица A, отвечающая за беспорядок в системе, построена на простой кубической решетке и имеет гауссово распределение недиагональных матричных элементов между ближайшими соседями с единичной дисперсией. Матрица M_0 — стандартная кристаллическая динамическая матрица, построенная на той же решетке, с единичными пружинками между ближайшими соседями. Безразмерный параметр μ характеризует относительную степень порядка в системе и меняется в интервале от нуля до бесконечности.

Мы показали, что добавлении твердых сферических нановключений с малым радиусом R ведет к изменению модуля Юнга в виде:

$$\Delta E \sim nkR^2, (2)$$

где k — характерная жесткость межатомного взаимодействия. Масштаб $Rc = k/E \sim \mu^{-1/2}$, при котором формулы (1) и (2) равны между собой, характеризует масштаб неоднородности аморфного тела. При $R >> Rc$ применима макроскопическая теория упругости. Однако при $R << Rc$ необходимо учитывать микроскопическую неоднородную структуру вещества. При этом изменение модуля Юнга ΔE может быть сопоставимо или даже превосходить исходное значение модуля Юнга E даже при малой объемной доле нановключений.

Список литературы

1. Stojanovic D., Orlovic A., Markovic S., Radmilovic V., Uskokovic P. S., Aleksic R., Nanosilica/PMMA composites obtained by the modification of silica nanoparticles in a supercritical carbon dioxide-ethanol mixture, J Mater Sci, 44, 6223, 2009;
2. Москалюк О.А., Самсонов А.М., Семенова И.В., Смирнова В.Е., Юдин В.Е., Механические свойства полимерных композитов с наночастицами диоксида кремния, Журнал технической физики, 87, 266, 2017;
3. Beltukov Y.M., Parshin D.A., Density of states in random lattices with translational invariance, Письма в ЖЭТФ, 93, 660, 2011;
4. Leonforte F., Boissiere R., Tanguy A., Wittmer J.P., Barrat J-L., Continuum limit of amorphous elastic bodies. III. Three-dimensional systems, Physical Review B, 72, 224206, 2005;
5. Beltukov Y.M., Kozub V.I., Parshin D.A., Ioffe-Regel criterion and diffusion of vibrations in random lattices, Phys. Rev. B, 87, 134203-1 — 134203-20, 2013.

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Генерация тока при деформации вертикально ориентированных углеродных нанотрубок

Коньшин А. А., Ильина М. В., Ильин О. И., Рудык Н. Н., Агеев О. А.

ИНЭП ЮФУ, НОЦ «Нанотехнологии»

Эл. почта: alexej94161@gmail.com

Современное развитие нанотехнологий инициировано исследованием ряда уникальных свойств наноструктур, не присущих объемным материалам. Недавние исследования углеродных наноструктур показали возможность проявления пьезоэлектрического эффекта, который открывает новые перспективы их применения [1-3].

Целью данной работы является исследование пьезоэлектрического отклика в вертикально ориентированных углеродных нанотрубках (ВО УНТ) путем детектирования электрического тока, возникающего при их деформации, методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

В качестве исследуемого образца использовался массив вертикально ориентированных углеродных нанотрубок с диаметром 34±3 нм, длиной 370±40 нм и плотностью 47 мкм$^{-2}$, выращенных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Исследования массива нанотрубок выполнялись методом АСМ на зондовой нанолаборатории Ntegra (НТ-МДТ, Россия). Деформация ВО УНТ формировалась в режиме силовой спектроскопии АСМ. Максимальное проникновение зонда в глубину массива не превышало 50 нм относительно вершины нанотрубки. С помощью встроенного осциллографа параллельно процессу деформации УНТ детектировался ток, протекающий в системе «нижний электрод/УНТ/зонд АСМ». Результаты проведенных исследований показали воспроизводимый пьезоэлектрический отклик углеродных нанотрубок при их деформации. Так, в начальный момент времени, когда зонд не давил на ВО УНТ, в системе не регистрировался ток. В дальнейшем, при увеличении силы давления зонда на ВО УНТ от 0 до 0,4 мкН, в системе возникал ток, значение которого нелинейно возрастало от 0 до 16 нА, соответственно. Детектируемый ток, вероятно, был связан с деформацией УНТ и проявлением пьезоэлектрического эффекта [3]. При последующем снятии нагрузки значение тока уменьшалось до нуля. Чтобы исключить влияние подложки и измерительной системы АСМ на пьезоэлектрический отклик углеродной нанотрубки, было проведено аналогичное исследование подложки с проводящей пленкой TiN, предварительно очи-

щенной от УНТ методом силовой литографии АСМ, результат которого показал отсутствие пьезоэлектрического отклика подложки и постоянную величину детектируемого тока на уровне 60 пА.

Таким образом, экспериментально подтверждено проявление пьезоэлектрического эффекта в углеродных нанотрубках, который может быть связан с асимметричным перераспределением плотности электронов при их деформации [4]. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных элементов нанопьезотроники и наносистемной технике на основе углеродных нанотрубок.

Результаты получены с использованием оборудования НОЦ и ЦКП «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-29-14023 офи_м) и внутреннего гранта Южного федерального университета (№ ВнГр-07/2017-26).

Список литературы

1. Z. L. Wang, Nanopiezotronics // Adv. Mater., 19, 889, 2007;
2. S.I. Kundalwal, S.A. Meguid, G.J. Weng, Strain gradient polarization in grapheme // Carbon, 117, 462, 2017;
3. M.V. Ilina, Yu.F. Blinov, O.I. Ilin, N.N. Rudyk, O.A. Ageev, Piezoelectric effect in non-uniform strained carbon nanotubes // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng, 012024, 256, 2017;
4. X. Wang, H. Tian, W. Xie, Y. Shu, W.-T. Mi, M. Ali Mohammad, Q.-Y. Xie, Y. Yang, J.-B. Xu, T.-L. Ren, Observation of a giant two-dimensional band-piezoelectric effect on biaxial-strained graphene. NPG Asia Mater. 7, 2015.

Применение сегнетоэлектриков в технологиях одновременного повышения удельной мощности и удельной энергии электропривода легкого транспорта

Зубцов В. И.[1]

[1]ПГУ, Белоруссия

Эл. почта: subcv@rambler.ru

В настоящее время во всем мире электромобили используются все более и более для решения существующих серьезных экологических проблем.

Энергетическая установка электромобиля должна иметь одновременно высокую удельную мощность и удельную энергию. С практической точки зрения из транспортных средств с электроприводом наибольший интерес представляют электромотоциклы, электроскутеры, электровелосипеды и миниавтомобили, относящиеся к легким транспортным средствам, в которых используются практически исключительно аккумуляторные батареи, обеспечивающие высокую удельную мощность, но обладающие низкой удельной энергией, что ограничивает активное время их пробега.

В связи с выше изложенным, предлагается экологически чистая установка альтернативной технологии на основе электрохимического генератора (ЭХГ) с использованием сенетопьезокерамики. Такая энергоустановка имеет одновременно высокую удельную мощность и удельную энергию [1]. В предлагаемой установке происходит увеличение электрической энергии как бы в 2 этапа: на первом происходит увеличение поляризованности сегнетоэлектрика; на втором усиление выходной электрической мощности.

Конструкция установки направлена на увеличение дальности пробега электротранспорта на одной зарядке аккумулятора. С учетом использования механической энергии коэффициент полезного действия (КПД) установки равен 50…55% [1-2].

Для эффективного использования сегнетоэлектриков требуется разработка системы, позволяющей, по сравнению с используемыми в настоящее время устройствами электропривода, расходовать меньше энергии от аккумуляторных батарей, а также увеличивать эффективность преобразования механической энергии в электрическую, ориентировочно на порядок, за счет электрических характеристик сенетопьезокерамики и физико-технических решений (технологий). В результате пробег электротранспорта на одной зарядке аккумулятора увеличивается в 4 раза (средне значение). Так электромобиль с энергией аккумулятора 14 кВт·ч и электродвигателем мощностью 13 кВт имеет активную дальность пробега 60 – 120 км при максимальной скорости движения 80 км/ч. Такие показатели, например, у электромобиля гордского назначения Buddy норвежской компании Pure Mobility AS. При использовании предлагаемой установки такой автомобиль проедет 240-480 км на одной зарядке аккумулятора.

Кроме того, установка может быть использована для энергоснабжения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, инвалидных колясок, офисных и загородных помещений и др.

Список литературы

1. Зубцов В.И., Зубцова Е.В. Увеличение удельной мощности и удельной энергии устройства на основе сегнетопьезоактивной керамики для электропривода //Матер. междун. конф. по физике и астрономии./ФТИ им. А.Ф. Иоффе.- С-Петербург, 2013 – с.243-244;
2. Зубцов В.И., Зубцова Е.В. Физико-технические аспекты эффективного применения сегнетоэлектриков для увеличения удельной мощности и удельной энергии устройств альтернативной энергетики//Матер. междун. конф. по физике и астрономии./ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – С-Петербург, 2015 – с.267-268.

Наноразмерные термитные материалы для устройств преобразования энергии в термоэлектрических батарях

Немцева С. Ю.[1], Лебедев Е. А.[1], Сорокина Л. И.[1], Шаман Ю. П.[1], Рязанов Р. М.[1], Громов Д. Г.[1], Гаврилов С. А.[1]

[1]МИЭТ
[2]НПК ТЦ

Эл. почта: nemtseva1@mail.ru

1. Введение

В настоящее время внимание ученых привлекает создание альтернативных и экологически-чистых источников энергии для работы в экстремальных условиях окружающей среды, например, таких как пониженные температуры и безвоздушное пространство. Термоэлектрические генераторы энергии в настоящее время изучены достаточно хорошо и находят своё применение в различных областях повседневной жизни [1]. Однако, для их работы необходим специализированный источник тепла. Традиционно, в термоэлектрических системах обеспечения питания различных маломощных приборов и устройств наноэлектроники, в качестве источника тепла используются топливные радиоизотопные вещества [2], энергия солнечного излучения [3], а так же тепло человеческого тела [4]. Для работы большинства из них требуется кислород, что накладывает ограничения на использование в безвоздушном пространстве и под водой. Термитные материалы характеризуются высокой плотностью энергии и скоростью горения, а также не требуют присутствия кислорода в окружающей среде. В настоящей работе в качестве источника тепла будут рассмотрены термитные порошковые материалы Al-Ni и Al-FeO_x, их влияние на характеристики термоэлектрической батареи.

2. Результаты и обсуждение

Исходные порошки Al, Ni, Fe_3O_4 имеют средний размер частиц порядка 70-100 нм. Термитные смеси были получены путем перемешивания компонентов в соотношении Al:Ni=50:50 ат.% и Al:Fe_3O_4=30:70 ат.% в ультразвуковой ванне в течение 2 часов. В смесь исходных порошков добавлялся гексан, который способствовал более тщательному перемешиванию, после чего удалялся с помощью роторного испарителя.

Для исследования тепловых эффектов химических реакций протекающих в исходных порошках Al-Ni и Al-Fe_3O_4 проводилась дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) TA Instruments Q600. Измерение скорости распространения фронта волнового горения после инициации материала производилось с помощью высокоскоростной видеосъемки со скоростью 10000 кадров в секунду. Для исследования выходных характеристик термоэлектрического генератора (ТЭГ) был сконструирован прототип термоэлектрической батареи (ТЭБ) при использовании функционального элемента выделения тепла на основе термитных материалов.

Для измерения характеристик термоэлектрической батареи применялся ТЭГ ТГМ-127-1.4-1.5, который устанавливался «холодной» стороной на радиатор, а на «горячую» помещался порошковый термитный материал (Al-Ni, Al-FeO_x), спрессованный в виде

диска диаметром 22 мм, толщиной менее 5 мм и массой от 0.3 до 3 г. Вторичное инициирование проводили с использованием структуры Al-CuO_x, сформированной на поверхности подложки электрофоретическим методом. Инициатор располагается на вершине термитного диска и, в свою очередь, запускается от искры пьезоэлектрического элемента. Элемент выделения тепла сверху накрывался гипсовой теплоизоляционной крышкой. Для измерения выходных характеристик (U_{xx}, Iкз и $U_{раб}$, $I_{раб}$ без нагрузки и с нагрузкой 1.8 Ом соответственно) контакты ТЭГ подключались в измерительную схему с мультиметром Keithley 2700 последовательно или параллельно в зависимости от фиксируемой величины.

3. Заключение

В результате проведенных исследований было обнаружено, что удельная теплота, скорость распространения фронта волнового горения, а также изменения выходных характеристик и пиковые значения напряжения и силы тока для термитной системы Al-FeO_x оказалась выше, чем для Al-Ni, при одинаковых значениях массы элемента выделения тепла, а время поддержания напряжения выше 2 В составило 30 и 20 секунд соответственно. Полученные результаты согласуются с полученными ранее и свидетельствуют о более высокой плотности энергии и скорости её высвобождения в системе Al-FeO_x.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №16-19-10625).

Список литературы

1. Yang Z., PradoGonjal J., Phillips M., S. Lan S., Powell A., Vaqueiro P., Gao M., Stobart R., Chen R., Improved thermoelectric generator performance using high temperature thermoelectric materials, SAE Technical Paper Series, 2017;
2. Bennett G. L. Lombardo, J. J., Hemler R. J., Silverman G., Whitmore C. W., Amos W. R., Johnson E. W., Zocher R. W., Hagan J. C., Englehart R. W., El-Genk M. S., The general-purpose heat source radioisotope thermoelectric generator: a truly general-purpose space RTG, AIP Conference Proceedings, 969, p.663, 2008;
3. Eswaramoorthy M., Shanmugam S., Solar parabolic dish thermoelectric generator: a technical study, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 35, 5, pp. 487–494, 2013;
4. Lay-Ekuakille A., Vendramin G., Trotta A., Mazzotta G., Thermoelectric generator design based on power from body heat for biomedical autonomous devices, IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications, pp. 1-4 2009.

InAs квантовые точки для каскадных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов

Паньчак Александр[1], Минтаиров С. А.[1], Минтаиров М. А.[1], Салий Р. А.[1], Шварц М. З.[1], Калюжный Н. А.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: a.panchak@mail.ioffe.ru

В настоящее время одними из самых эффективных преобразователей лучистой энергии являются трехпереходные GaInP/GaAs/Ge солнечные элементы (СЭ), включающие *p-n* переходы (субэлементы) с различной шириной запрещенной зоны для работы в трех спектральных диапазонах длин волн. Таким образом, уменьшаются потери на термализацию носителей заряда и неполное поглощение излучения. Одной из проблем в трехпереходных СЭ является неравномерная генерация тока в субэлементах: так в среднем GaAs субэлементе генерируется наименьший фототок. Проблема дисбаланса токов может быть решена с помощью увеличения генерации тока в среднем субэлементе за счет расширения его спектральной чувствительности [1], в частности за счет использования массива квантовых точек (КТ) InAs.

Как правило, InAs КТ в матрице GaAs выращиваются методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Однако промышленное производство СЭ методом МПЭ не ведется, т.к. при их производстве требуется создавать приборы большой площади. Поэтому полупроводниковые СЭ, как правило, производятся с использованием технологии металлорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), которая обеспечивает высокую скорость роста и большую площадь приборов, выращиваемых в одном процессе. Однако, формирование InAs КТ этим методом исследовано слабо. Поэтому для GaAs СЭ была разработана МОГФЭ технология КТ, не уступающая по структурному совершенству КТ, выращенным методом МПЭ. Анализ спектров ФЛ показал бимодальное распределение КТ по размерам, что также подтвердилось изображениями, полученными методом атомно-силовой микроскопий [2]. Выращены структуры с 10 и 15 слоями квантовых точек [3]. Средний латеральный размер квантовых точек, полученных в ходе разработки технологии роста, составлял около 16 нм, а высота порядка 6 нм. Получены GaAs субэлементы с InAs КТ, продемонстрировавшие расширенную на диапазон длин волн 900-1200 нм спектральную фоточувствительность. В пересчете на 1 слой субэлемент с 10 слоями КТ показал рекордное значение вырабатываемого за счет поглощения подзонных фотонов тока (0.07мА/см^2).

Так как InAs КТ формируют большое количество локализованных энергетических уровней в запрещенной зоне GaAs, то при модельных описаниях спектральных зависимостей и оценках максимального фототока требовался учет переходов между всеми такими уровнями в массиве КТ. Как правило, для материалов со структурой типа цинковой обманки эта задача решается с помощью 8-зонной модели полупроводника, что требует использования массивного математического аппарата со значительными временными затратами. Так для расчёта интересующей нас структуры необходимо время по-

рядка одного месяца [4]. Поэтому для моделирования поглощения света массивом КТ применялся метод эмпирического гамильтониана. В рамках этого метода используется 4-зонное приближение энергетической структуры полупроводника. Общее время расчета оптических параметров исследуемой структуры при этом составляет около 2 часов [4, 5].

Установлено, что увеличение размеров КТ ведет к повышению фотогенерированного тока, однако эффективность генерации фототока замедляется при увеличении размера КТ в массиве. Увеличение размеров КТ более 30 нм не приводит к заметному росту фототока. Установлено, что массив из 30 слоев квантовых точек размерами 16×16×6 нм обеспечивает генерирацию добавочного ток в 2 мА/см^2 для GaAs субэлемента, уравнивая его по фототоку с GaInP.

Список литературы

1. М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, Оценка потенциальной эффективности многопереходного солнечного элемента при предельном балансе фотогенерированных токов, Физика и техника полупроводников, 49, 682-688, 2015;
2. Р.А.Салий, С.АМинтаиров, П.Н.Брунков, А.М.Надточий, А.С.Паюсов, Н.А.Калюжный Определение технологических параметров роста в системе InAs-GaAs для синтеза “многомодальных” квантовых точек InAs методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, Физика и техника полупроводников, 49, 1136-1143, 2015;
3. N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, R.A. Salii, A.M. Nadtochiy, A.S. Payusov, P.N. Brunkov, V.N. Nevedomsky, M.Z. Shvarts, A. Marti, V.M. Andreev, A. Luque, Increasing the quantum efficiency of InAs/GaAs QD arrays for solar cells grown by MOVPE without using strain-balance technology, Prog Photovoltaics, 24, 1261-1271, 2016;
4. A. Luque, A. Panchak, A. Mellor, A. Vlasov, A. Marti, V. Andreev, Comparing the Luttinger-Kohn-Pikus-Bir and the Empiric K. P Hamiltonians in quantum dot intermediate band solar cells manufactured in zincblende semiconductors, Solar Energy Materials and Solar Cells, 141, 39-48, 2015;
5. A. Luque, A. Panchak, A. Vlasov, A. Marti, V. Andreev, Four-band Hamiltonian for fast calculations in intermediate-band solar cells, Physica E, 76, 127-134, 2016.

Малоразмерные концентраторы солнечного излучения из термопластичных материалов

Филимонов Е. Д.[1], Левина С. А. [1], Емельянов В. М.[1], Солуянов А. А.[1], Шварц М. З.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: efilimonov@mail.ioffe.ru

Активное проникновение современных аддитивных технологии в различные области науки и производства обеспечивает ускоренное развитие инновационных подходов при создании новых приборов и устройств. Незамедлительно преимущества 3D печати нашли свое применение при изготовлении элементов функциональной оптики, где поль-

зователи получают выгоду от быстрых и гибких итераций дизайна, а также свободы выбора оптических форм.

Одной из областей широкого применения оптических элементов классической [1] и свободной [2] форм является концентраторная фотовольтаика. Привлечение возможностей 3D печати значительно расширяет как диапазон самих способов изготовления концентраторов (например, к настоящему времени для формирования линз Френеля наибольшее распространение получили метод горячего прессования линзы из ПММА и метод алмазного точения матриц с последующим формированием профиля Френеля из оптического силикона на стекле), так и гамму оптических материалов, которые могут быть задействованы при изготовлении концентрирующей оптики [3, 4].

Для изготовления высокоэффективных малоразмерных оптических элементов с характерными (микронными) требованиями по воспроизведению профилей преломляющих поверхностей необходимо не только исследовать потенциал различных технологии 3D-печати, доступных сегодня на рынке, подбирать (синтезировать) оптические материалы с увеличенным показателем преломления, низкой дисперсией и высокой световой стойкостью, но и проектировать саму форму концентраторов излучения наиболее полно использующую технологический потенциал оборудования и удовлетворяющую критерию минимальных оптических потерь излучения при максимальной концентрирующей способности.

В работе решается комплексная задача проектирования профиля линзы Френеля, при котором обеспечивается максимальная концентрация излучения в фокальном пятне минимального размера и отвечающего технологическим требованиям и особенностям производства методом 3D печати, оценки оптических и функциональных параметров термопластичного материала (с точки зрения пригодности к использованию для изготовления высокоэффективных преломляющих концентраторов излучения) и исследования оптико-энергетических характеристик готовых образцов. Для 3D линз Френеля будут представлены результаты исследований геометрических отклонений формы оптических поверхностей и погрешностей профиля, оптико-энергетических характеристик с установлением причин «размытости» фокального пятна и их связи с искажением формы преломляющих поверхностей, определена степень влияния геометрических отклонений преломляющего профиля на концентрирующую способность линзы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант 17-08-00247-а).

Список литературы

1. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology (eds C. Algora and I. Rey-Stolle), 2016;
2. R. Winston, J. C. Miñano, and P. Benítez, with contributions by N. Shatz and J. C. Bortz, Nonimaging Optics, (Elsevier-Academic Press, New York, 2005);
3. https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview#material-jetting;
4. https://www.luximprint.com/services/optics-prototyping;

Влияние кулоновского взаимодействия носителей заряда в волноводной области на порог инверсии лазера на квантовых ямах

Карпова А. А.[1], Зегря Г. Г.[2]

[1]ИТМО
[2]ФТИ

Эл. почта: va7059va@yandex.ru

В настоящее время актуальной областью исследований полупроводниковой оптоэлектроники являются лазеры с длиной волны 1.3 – 1.55 мкм, соответствующие второму и пятому окнам прозрачности оптоволокна, использующегося в волоконно-оптических линиях связи. Такими лазерами являются системы на основе твердых растворов InGaAs/InP.

Поскольку обязательным условием лазерной генерации является обеспечение инверсной заселенности энергетических уровней активной среды, то особенный интерес представляет изучение различных явлений, способных оказывать существенное влияние на порог инверсии лазера. Целью данной работы является исследование влияния кулоновского взаимодействия носителей заряда в волноводной области на порог инверсии лазера на квантовых ямах. Речь идет о процессе Оже-рекомбинации (ОР), при котором энергия рекомбинации электрона и дырки, локализованных в квантовых ямах (КЯ), передается за счет кулоновского взаимодействия электрону в барьерной области.

Как показывают теоретические расчеты и экспериментальные результаты, в лазерной структуре InGaAs/InP электрон за счет теплового возбуждения выбрасывается в волноводную область [1]. В результате происходит перераспределение электронов между квантовой ямой и барьерной областью, определяемое условием квазинейтральности. Известно, что время жизни электронов в квантовой яме зависит от трех процессов: излучательной рекомбинации, безызлучательной ОР электронов и дырок, локализованных в КЯ [2], и безызлучательной рекомбинации электронов в КЯ, взаимодействующих с электронами в волноводной области. Следовательно, последний процесс безызлучательной рекомбинации также необходимо учитывать при анализе пороговых характеристик лазеров на КЯ.

Ожидается, что вероятность процесса Оже-рекомбинации, рассматриваемого в данной работе, будет пропорциональна двумерной концентрации электронов в волноводной области. Для мелких КЯ скорость данного процесса будет сравнима или превышать скорость излучательной рекомбинации.

В настоящей работе построена микроскопическая теория процессов ОР электронов в КЯ и барьерной области. Показано, что коэффициент ОР немонотонно зависит от ширины КЯ [3]. Скорость ОР растет с увеличением температуры степенным образом (практически линейно). При высоких уровнях возбуждения (в режиме генерации) время ОР может быть порядка и даже меньше времени излучательной рекомбинации [4].

Механизм влияния кулоновского взаимодействия носителей заряда в квантовой яме и волноводной области на пороговые характеристики лазера на квантовых ямах в данной работе исследуется впервые.

Список литературы

1. Зегря, Г. Г., Пихтин, Н. А., Скрынников, Г. В., Слипченко, С. О., & Тарасов, И. С. Исследование пороговых характеристик InGaAsP/InP-гетеролазеров (λ= 1.55мкм). Физика и техника полупроводников, 35(8), 1001-1008, 2001;
2. Zegrya, G. G., & Polkovnikov, A. S. Mechanisms of Auger recombination in quantum wells. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 86(4), 815-832, 1998;
3. Гунько, Н. А., Полковников, А. С., & Зегря, Г. Г. Расчет коэффициентов ожерекомбинации в гетероструктуре с квантовыми ямами InGaAsP/InP. Физика и техника полупроводников, 34(4), 462-466, 2000;
4. Asryan, L. V., Gun'Ko, N. A., Polkovnikov, A. S., Zegrya, G. G., Suris, R. A., Lau, P. K., & Makino, T. Threshold characteristics of InGaAsP/InP multiple quantum well lasers. Semiconductor science and technology, 15(12), 1131-1140, 2000.

Quickly tunable electromagnetic environment for quantum electric circuits

Sevriuk Vasilii [1], Tan K. Y. [1], Masuda S.[1], Goetz J.[1], Partanen M.[1], Silveri M.[1], Hyyppä E.[1], Govenius J.[1], Lake R.[2], Vesterinen V.[3], Grönberg L.[3], Hassel J.[3], Simbierowicz S.[3], Gunyho M.[1], Keränen A.[1], Tuorila J.[1], Ala-Nissila T.[4], Hazra D.[1], Grabert H.[5], Möttönen M.[1]

[1]Aalto University
[2]NIST, USA
[3]VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
[4]Loughborough University, UK
[5]University of Freiburgy, Germany

Эл. почта: banansa@mail.ru

Quantum electric circuits enable precise control and manipulation of quantum degrees of freedom not available in the classical regime. In particular, superconducting circuits provide a scalable platform for quantum computing and simulations. We have recently demonstrated a quantum-circuit refrigerator (QCR) [1, 2] which we directly used to cool a superconducting resonator mode, and subsequently show that the QCR can be utilized as a cryogenic photon source [3]. Here, we present our new studies of in-situ control of the strength of dissipation in a superconducting resonator using a QCR, revealed through a microwave reflection experiment. Namely, we show experimental data of the effective quality factor of the superconducting res-

onator as a function of the QCR bias voltage. Finally, we also present preliminary experimental results on nanosecond operation of a QCR to cool a superconducting resonator.

Список литературы

1. Tan K.Y., and Partanen M., and Lake R.E., and Govenius J., and Masuda S., and Möttönen M., Quantum-circuit refrigerator, Nature Communications, 8, 15189, 2017;
2. Silveri M., and Grabert H., and Masuda S., and Tan K.Y., and Möttönen M., Theory of quantum-circuit refrigeration by photon-assisted electron tunneling, Phys. Rev. B, 96, 094524, 2017;
3. Masuda S., and Tan K.Y., and Partanen M., and Lake R.E., and Govenius J., and Silveri M., and Grabert H., and Möttönen M., Cryogenic microwave source based on nanoscale tunnel junctions, arXiv:1612.06822, 2016.

Влияние диполь-дипольного взаимодействия на динамику квантовых корреляций в двойной модели Джейнса-Каммингса

Евсеев М. М.[1], Башкиров Е. К.[1]

[1]Самарский университет

Эл. почта: mihail.evseev.2011@mail.ru

Для физики квантовых вычислений необходимы теоретические исследования особенностей динамики квантовых корреляций систем кубитов, взаимодействующих с электромагнитными полями в резонаторах. Как хорошо известно, диполь-дипольное взаимодействие атомных систем является естественным механизмом возникновения квантовых корреляций кубитов. При этом для искусственных атомов, в частности сверхпроводящих кубитов, диполь-дипольное взаимодействие может быть значительно больше, чем для обычных атомов и ионов. В настоящей работе нами исследовано влияние прямого диполь-дипольного взаимодействия на динамику квантовых корреляций двух идентичных сверхпроводящих кубитов, взаимодействующих нерезонансным образом с двумя модами микроволнового поля двух независимых копланарных резонаторов. Исследование такой системы проведено в рамках так называемой двойной модели Джейнса-Каммингса.

В работе рассмотрена система, состоящая из двух идентичных сверхпроводящих кубитов *A* и *B* и двух мод полей резонаторов *a* и *b*. При этом кубит *A* нерезонансно взаимодействует с модой поля резонатора *a*, а кубит *B* — с модой поля резонатора *b*. Между кубитами *A* и *B* имеется прямое диполь-дипольное взаимодействие. Гамильтониан такой системы можно записать в виде

$$\hat{H} = \frac{1}{2}\hbar\omega_0(\hat{\sigma}_A^z + \hat{\sigma}_B^z) + \hbar(\omega_0 + \delta_a)\hat{a}^+\hat{a} + \hbar(\omega_0 + \delta_b)\hat{b}^+\hat{b} +$$

$$+\hbar\gamma_a(\hat{\sigma}_1^+\hat{a} + \hat{a}^+\hat{\sigma}_1^-) + \hbar\gamma_b(\hat{\sigma}_2^+\hat{b} + \hat{b}^+\hat{\sigma}_2^-) + \hbar J(\hat{\sigma}_1^+\hat{\sigma}_2^- + \hat{\sigma}_2^+\hat{\sigma}_1^-),$$

где $\frac{1}{2}\hat{\sigma}_i^z = \frac{1}{2}(|+\rangle_{ii}\langle +| - |-\rangle_{ii}\langle -|)$ — оператор инверсии для $i-$ того кубита ($i = A, B$), $\hat{\sigma}_i^+ = |+\rangle_{ii}\langle -|$ и $\hat{\sigma}_i = |-\rangle_{ii}\langle +|$ — операторы перехода между возбуждённым $|+\rangle_i$ и основным $|-\rangle_i$ состоянием $i-$ того кубита, $\hat{a}^+$ и $\hat{a}$ — операторы рождения и уничтожения фотонов моды резонатора a, $\hat{b}^+$ и $\hat{b}$ — операторы рождения и уничтожения фотонов моды резонатора b, $\hbar\omega_0$ — энергетическая щель сверхпроводящего кубита, γ_a (γ_b) — константа взаимодействия кубита A (B) с модой моля резонатора a (b), J — константа дипольного взаимодействия кубитов.

В качестве начального состояния кубитов рассмотрено расширенное вернеровском состояние вида

$$\rho_{AB}(0) = \frac{1-p}{4}\hat{I} + p\,|\Phi\rangle\langle\Phi|,$$

где $\hat{I}$ — единичный оператор в подпространстве кубитов, p — вещественный параметр, определяющий степень запутанности начального состояния кубитов ($p \in [0,1]$), $|\Phi\rangle = \cos(\theta)|+\rangle + \sin(\theta)\exp(i\phi)|-\rangle$. При этом обе моды поля двух резонаторов находятся в вакуумных состояниях $\rho_{ab} = |00\rangle\langle 00|$.

Для рассматриваемой модели в представлении одетых состояний нами найдено точное решение квантового уравнения Лиувилля для полной временной матрицы плотности $\rho(t)$. При этом использованы базисные состояния вида

$|\xi_1\rangle = |+,+,0,0\rangle$ $|\xi_6\rangle = |-,-,2,0\rangle$ $|\xi_{10}\rangle = |+,-,0,0\rangle$
$|\xi_2\rangle = |+,-,0,1\rangle$ $|\xi_7\rangle = |-,-,1,1\rangle$ $|\xi_{11}\rangle = |-,+,0,0\rangle$
$|\xi_3\rangle = |+,-,1,0\rangle$ $|\xi_8\rangle = |-,-,0,2\rangle$ $|\xi_{12}\rangle = |-,-,1,0\rangle$
$|\xi_4\rangle = |-,+,0,1\rangle$ $|\xi_9\rangle = |-,-,0,0\rangle$ $|\xi_{13}\rangle = |-,-,0,1\rangle$
$|\xi_5\rangle = |-,+,1,0\rangle$

Для исследования динамики квантовых корреляций нами рассчитаны как отрицательность и согласованность кубитов, так и энтропия фон Неймана для подсистемы кубитов и каждого кубитов в отдельности.

Отрицательность для подсистемы кубитов можно определить как $\varepsilon = -2\sum_i \mu_i$, где μ_i — отрицательные собственные значения частично транспонированной по переменным одного кубита редуцированной матрицы плотности, которая имеет вид

$$\rho_{AB}^{T_B} = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{1\,10} & \rho_{1\,11}^* & \rho_{24}^* + \rho_{35}^* + \rho_{10\,11}^* \\ \rho_{1\,10}^* & \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{10\,10} & \rho_{19}^* & \rho_{2\,13}^* + \rho_{3\,12}^* + \rho_{9\,10} \\ \rho_{1\,11} & \rho_{19} & \rho_{44} + \rho_{55} + \rho_{11\,11} & \rho_{4\,13} + \rho_{5\,12} + \rho_{9\,11}^* \\ \rho_{24} + \rho_{35} + \rho_{10\,11} & \rho_{2\,13} + \rho_{3\,12} + \rho_{9\,10}^* & \rho_{4\,13}^* + \rho_{5\,12}^* + \rho_{9\,11} & \sum\limits_{i=6,7,8,9,12,13} \rho_{ii} \end{pmatrix},$$

здесь $\rho_{ij} = \langle \xi_i \mid \rho(t) \mid \xi_j \rangle$.

Согласованность для системы, описываемой матрицей плотности ρ , можно определить в виде $C = max(\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2} - \sqrt{\lambda_3} - \sqrt{\lambda_4}, 0)$, где λ_k — собственные значения матрицы $\rho_C = \rho\tilde{\rho}$, $\tilde{\rho} = (\hat{\sigma}_y \otimes \hat{\sigma}_y)\rho^*(\hat{\sigma}_y \otimes \hat{\sigma}_y)$, $\hat{\sigma}_y$ — матрица Паули.

$$\hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

Энтропию фон Неймана для системы, описываемой матрицей плотности ρ , можно определить в виде $S(\rho) = -Tr(\rho \log_2 \rho)$. Нами найдена энтропия фон Неймана как для подсистемы кубитов, так и для каждого кубита. Явное выражение для энтропии фон Неймана подсистемы кубитов не приведено здесь ввиду его исключительной громоздкости.

Энтропии для отдельных кубитов можно представить в виде

$$S(\rho_A) = -(\lambda_A^+ \log_2 \lambda_A^+ + \lambda_A^- \log_2 \lambda_A^-),$$

$$S(\rho_B) = -(\lambda_B^+ \log_2 \lambda_B^+ + \lambda_B^- \log_2 \lambda_B^-),$$

где

$$\lambda_A^{\pm} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\mid \rho_{111} + \rho_{213} + \rho_{312} + \rho_{910}^* \mid^2 + \left(\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{1010} - \frac{1}{2}\right)^2},$$

$$\lambda_B^{\pm} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\mid \rho_{110} + \rho_{413} + \rho_{512} + \rho_{911}^* \mid^2 + \left(\rho_{11} + \rho_{44} + \rho_{55} + \rho_{1111} - \frac{1}{2}\right)^2}.$$

Полученные выражения для энтропий фон Неймана, отрицательности и согласованности кубитов использованы нами для численного моделирования особенностей временного поведения квантовых корреляций в двойной модели Джейнса-Каммингса при наличии диполь-дипольного взаимодействия кубитов.

Внутренние потери излучения в полупроводниковых лазерах с напряженными квантовыми ямами InGaAsP/InP

Павлов Н. В.[1], Зегря Г. Г.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: pavlovnv@mail.ru

В настоящее время широкое применение в оптических линиях связи получили полупроводниковые лазеры с квантовыми ямами (КЯ) на основе соединений InGaAsP/InP с длиной волны генерации 1.3 и 1.55 мкм. Однако при высоких температурах в них наблюдается сильное внутризонное поглощение излучения, которое ведет к срыву генерации. С уменьшением толщины активной области внутризонное поглощение возраста-

ет, и коэффициент поглощения может достигать величины в несколько десятков обратных сантиметров.

Механизмы внутризонного поглощения излучения в лазерах на квантовых ямах исследуются как теоретически, так и экспериментально на протяжении многих лет. Экспериментальные результаты показывают, что коэффициент внутризонного поглощения лазерного излучения существенно выше, чем предсказывает теория. Одним из кандидатов на объяснение данных результатов является процесс внутризонного поглощения излучения дырками с переходом в спин-отщепленную (so) зону.

В настоящей работе в рамках четырехзонной модели Кейна выполнен микроскопический анализ механизма внутризонного поглощения излучения дырками с переходом их в спин-отщепленную зону для напряженных квантовых ям на основе твердых растворов InGaAsP/InP. Расчет произведен для двух поляризаций падающего излучения: вдоль оси роста кристалла и в плоскости квантовой ямы. Показано, что данный процесс может быть основным механизмом внутренних потерь излучения для лазеров на квантовых ямах и учет данного механизма поглощения позволяет объяснить расхождения между теоретическими оценками величины внутренних потерь и экспериментальными данными.

Расчеты проведены с учетом упругих напряжений, возникающих вследствие рассогласования слоев по параметру решетки. В работе впервые получены кейновские уравнения с учетом упругих напряжений и несферичности kP-гамильтониана, получены аналитические выражения для энергетических спектров и волновых функций носителей заряда с учетом данных эффектов.

Показано, что учет влияния упругих напряжений на спектр и волновые функции носителей заряда приводит к увеличению коэффициента внутризонного поглощения вследствие увеличения компоненты волновой функции so-дырок с s-симметрией. Также поглощение света, поляризованного в плоскости квантовой ямы, оказывается существенно сильнее, чем поглощение света, поляризованного вдоль оси роста кристалла. Также зависимость коэффициента поглощения от ширины квантовой ямы имеет максимум при ширине ямы от 40 до 60 А.

Достаточно существенным оказывается влияние несферичности, вследствие расхождения значений обобщенных параметров Латтинжера γ_2 и γ_3 более чем на 30%. Показано, что учет несферичности kP-гамильтониана приводит к уменьшению коэффициента внутризонного поглощения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-01130-А.

Механизм влияния зарождающейся сверхпроводящей фазы на электронные свойства в слоистом материале FeSe

Могилюк Тарас[1], Григорьев П. Д.[2], Кешарпу К. К.

[1]НИЦ Курчатовский институт
[2]ИТФ им. Л.Д Ландау РАН
[3]МИСиС

Эл. почта: 5taras@mail.ru

Сверхпроводимость в наиболее перспективных соединениях, таких как медноокисдные или железосодержащие соединения, как правило, проявляется при наличии нестехиометрии химического состава или легировании. Сверхпроводимость в таких системах, возможно, первоначально возникает в виде небольших изолированных сверхпроводящих островков [1], которые становятся соединёнными и когерентными при понижении температуры или при изменении других параметров, таких как легирование или давление. Именно такое поведение было обнаружено недавно в работе [2] при исследовании монокристаллов FeSe: измерения проводимости мостиковых структур, ориентированных перпендикулярно слоям монокристаллов FeSe, показали присутствие избыточной проводимости, наблюдавшейся до температуры 40 К. Детальные измерения магнитной восприимчивости монокристаллов FeSe позволили обнаружить появление слабого диамагнитного отклика при тех же температурах. Причём в транспортных измерениях эффект проявлялся анизотропно: избыточная проводимость при высоких T наблюдалась лишь в транспорте в направлении, перпендикулярном слоям FeSe, тогда как в транспорте в плоскости слоев эффект избыточной проводимости наблюдался лишь в узкой области температур сверхпроводящих флуктуаций (не более 1–2 К выше Tc = 8 К). Данные результаты были интерпретированы как результат проявления неоднородной сверхпроводимости в виде малых включений с объемной долей $\sim 10^{-3}$–10^{-4} [2].

В настоящей работе предложено теоретическое описание проводимости именно в такой неоднородной системе со сверхпроводящими островками сфероидной формы с произвольным эксцентриситетом, т.е. в форме эллипсоида вращения с двумя одинаковыми главными осями вдоль проводящей плоскости и меньшей главной осью в межслоевом направлении. Анализ полученных экспериментальных результатов в рамках данной модели позволил получить как качественное, так и количественное согласие при оценке доли сверхпроводящей фазы, полученной при измерениях магнитной восприимчивости и электронного переноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 18-32-00205, 18-02-01022, 18-02-00280).

Список литературы

1. V. Z. Kresin, Yu. N. Ovchinnikov, and S. A. Wolf, Physics Reports 431, 231 (2006);
2. A. A. Sinchenko, P. D. Grigoriev, A. P. Orlov, A. V. Frolov, A. Shakin, D. A. Chareev, O. S. Volkova, and A. N. Vasiliev, Phys. Rev. B 95, 165120 (2017);

3. P.D. Grigoriev, A.A. Sinchenko, K.K. Kesharpu, A. Shakin, T.I. Mogilyuk, A.P. Orlov, A.V. Frolov, D.S. Lyubshin, D.A. Chareev, O.S. Volkova, A.N. Vasiliev // JETP Letters, Vol. 105, Issue 12, P. 786–791 (DOI:10.1134/S0021364017120074).

Создание многопереходного солнечного элемента на основе материалов $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$

Лухмырина Татьяна[1],

[1]СПбАУ РАН

Эл. почта: h7k9g00@gmail.com

В настоящее время идет активная разработка солнечных элементов (СЭ) с целью получения высокого показателя КПД и радиационной стойкости. Наибольшие успехи достигнуты при использовании многопереходных гетероструктур на основе фосфидов выращенных на подложках Ge, InP. Однако такие СЭ сложны в изготовлении и обладают очень высокой себестоимостью.

Нами преложена технология изготовление многопереходных СЭ методом МПЭ на подложках GaAs (001) с использованием метаморфного буферного слоя $In_xGa_{1-x}As$ с линейным изменением состава по In ([1-2]) с использованием материалов группы A_3As и широкозонных соединений (Zn, Cd, S, Se).

В рамках данной работы был предложен дизайн СЭ, произведены расчеты подходящих режимов его роста и ожидаемых рабочих параметров [3]. Так же проанализированы механизмы релаксации, проведена оценка критических толщин ([4-6]), и показано согласие полученных оценок с данными эксперимента.

Список литературы

1. V. Krishnamoorthy, P. Ribas, and R. M. Park, Appl. Phys. Lett. 58, 2000, 1991;
2. K. Inoue, J.C. Harmand, T. Matsuno, High-quality $In_xGa_{1-x}As$/InAlAs modulation-doped heterostructures grown lattice-mismatched on GaAs substrates, J. of Crystal Growth, 111, 313—317, 1991;
3. E. A. Evropeytsev, S. V. Sorokin, S. V. Gronin, Optical Studies of Carriers' Vertical Transport in the Alternately-Strained $ZnS_{0.4}Se_{0.6}$/CdSe Superlattice – Semiconductors, 49, 3, 352–357, 2015;
4. J. W. Matthews, A. E. Blakeslee, DEFECTS IN EPITAXIAL MULTILAYERS, J. of Crystal Growth, 27, 118-125, 1974;
5. R. People and J. C. Bean, Caclulation of critical layer thickness versus lattice mismatch for Ge_XSi_{1-x}/Si strained-layer heterostructures, Appl. Phys. Lett. 47, 322, 1985;
6. J. Tersoff Dislocations and strain relief in compositionally graded layers, Appl. Phys. Lett., 62, 693, 1993.

Моделирование нанокомпозитных полевых эмиттеров в COMSOL Multiphysics с использованием данных полевого эмиссионного проектора

Чумак М. А.[1], Колосько А. Г.[2], Филиппов С. В. [2], Попов Е. О.[2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ

Эл. почта: equilibrium2027@yandex.ru

Эффект полевой эмиссии электронов из углеродных нанотрубок (УНТ) имеет много областей применения. Они являются основой для производства плоских дисплеев, катодно-лучевые трубки и планарные источники света, источников электронов для электронной микроскопии высокого разрешения и электронно-лучевого осаждения, электронно-лучевой литографии, СВЧ – усилителей, источники рентгеновского излучения и т. д. [1].

Полевые эмиттеры представляют собой сложные системы для анализа их свойств и характеристик, так как процесс полевой эмиссии зависит от многих внешних и внутренних факторов. Методы математического моделирования позволяют выделить основные факторы, определяющие их свойства, предсказать эволюцию их эмиссионных характеристик, изучить реакцию моделируемой физической системы на изменение её параметров и начальных условий, выделить из общей системы и исследовать процессы, которые интересны для детального анализа, имитировать поведение системы в отсутствие факторов, которые усложняют процесс её познания.

Одним из факторов, влияющих на эмиссионные свойства полевого эмиттера, является взаимное расположение эмиссионных центров. Напряжённость поля, а, следовательно, и коэффициент усиления поля (field enchancement factor — FEF) каждого эмиссионного центра в плотном массиве из-за наличия соседей становится меньше того, которое он должен был бы принять, будучи изолированным. Это явление известно, как эффект взаимной экранировки эмиттеров [2]. В работе [3] было показано, что для достижения полного отсутствия эффекта экранировки, нанотрубки следует размещать на расстоянии равном их собственной пятикратной высоте. В работе [4] был проведён эксперимент, наглядно демонстрирующий этот эффект.

Согласно работе [5] FEF на вершинах УНТ увеличивается благодаря их расположению на возвышенных участках (микроскопических шероховатостях полевого эмиттера). Кроме того, утверждается, что при аналитическом расчёте этого FEF действует операция умножения FEF вершин выступов без нанотрубок на FEF нанотрубок, расположенных на плоской проводящей подложке без выступов.

В представленной работе мы построили модель многоострийного полевого эмиттера на основе экспериментальных данных, полученных в результате обработки картин свечений полевого эмиссионного проектора, и провели компьютерное моделирование распределения электрического поля на его поверхности в COMSOL Multiphysics 3.0. Данные о пространственном расположении эмиссионных центров и их эффективных высо-

тах были получены из картин свечений и вольт-амперных характеристик (ВАХ) при помощи алгоритмов, реализованных в программном пакете LabView 2016 [6].

Максимальная яркость каждого эмиссионного центра на картине была использована в качестве весового коэффициента для расчёта его токовой нагрузки, а по токовой нагрузке методом решения обратного уравнения Фаулера-Нордгейма были найдены FEF.

Экспериментальный образец представлял собой нанокомпозит, состоявший из полистирольной матрицы и наполнителя, в качестве которого выступали неупорядоченные многослойные УНТ. Такой тип эмиттеров имеет очень сложную морфологию: полистирольная матрица формирует холмистую поверхность, а выступающие над ней УНТ ориентированы хаотично и местами образуют пучки.

В рамках представленной методики точное моделирование поверхности такого типа эмиттеров является невозможным, поэтому было решено представить каждый эмиссионный центр в виде полусферы (шероховатости, благодаря которой достигается существенное усиление электрического поля) и вертикального цилиндра со скруглённой вершиной (с размерами, совпадающими с паспортными данными экспериментальных УНТ), расположенного на вершине полусферы.

Полученное в результате моделирования распределение электрического поля на поверхности эмиттера позволило вычислить и сравнить модельные и экспериментальные ВАХ, а также оценить величину эффекта экранировки соседних эмиссионных центров.

Список литературы

1. De Jonge N., Bonard J.-M., Carbon nanotube electron sources and applications, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 362, 2239–2266, 2004;
2. Harris J.R., Jensen K.L., Shiffler D.A. Dependence of optimal spacing on applied field in ungated field emitter arrays, AIP Advances, 5, 087182-1-7, 2015;
3. Smith R.C., Silva S.R.P., Maximizing the electron field emission performance of carbon nanotube arrays, Appl. Phys. Lett., 94, 133104-1-3, 2009;
4. Tang W.W., Shiffler D.A. et al., Field emission characteristics of a small number of carbon fiber emitters, AIP Advances, 6, 095007-1-9, 2016;
5. Liu H., Saito Y., Influence of Surface Roughness on Field Emission of Electrons from Carbon Nanotube Films, J. Nanosci. Nanotechnol., 10, 3983–3987, 2010;
6. Popov E.O., Kolosko A.G. et al., Local current–voltage estimation and characteristization based on field emission image processing of large-area field emitters, J. Vac. Sci. Technol. B, 36, 02C106-1-5, 2018.

Моделирование стохастических процессов в эмиссионных характеристиках источников свободных электронов

Пирогов Ю. В.[1], Колосько А. Г.[2], Филиппов С. В.[2], Попов Е. О.[2]

[1]СПбГУТ
[2]ФТИ

Эл. почта: yurypirogov711@yandex.ru

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к возможностям создания нового класса приборов на основе многоострийных полевых эмиттеров, состоящих из нанокомпозитных структур. Одним из перспективных направлений разработки являются эмиттеры на основе проводящих углеродных нанотрубок, закреплённых в слое полимерного диэлектрика [1]. Исследование их свойств и оптимизация технологического процесса производства связаны с рядом сложностей. В основном, это нерегулярность расположения эмиссионных центров на подложке, стохастический разброс их эффективных высот, взаимодействие между соседними центрами и адсорбционно-десорбционные процессы, происходящие в условиях технического вакуума. В связи с этим изучение взаимосвязи между морфологией эмиттера, его электрофизическими свойствами и вакуумными условиями является весьма актуальной задачей.

Одним из подходов к изучению подобных процессов, является компьютерное моделирование характеристик многоострийных полевых эмиттеров, позволяющее выявить основные закономерности стохастических процессов на поверхности эмиттера. Такая разработка теоретических моделей может стать ключом к пониманию и последующему управлению электровакуумными приборами на основе углеродных нанотрубок.

В представленной работе было проведено моделирование флуктуаций вольт-амперной характеристики многоострийного полевого катода, основанных на адсорбционно-десорбционных процессах. В качестве платформы для моделирования было выбрано программное обеспечение LabVIEW, позволяющее создавать виртуальные приборы и проводить виртуальные эксперименты.

Модель основана на двухкомпонентном эмиттере с центрами эмиссии, обладающими двумя разными работами выхода: с адсорбированными частицами и без. Распределение эмиссионных центров по эффективным высотам задавалось в форме распределения Гаусса с параметрами близкими к параметрам реальных нанокомпозитных эмиттеров из нанотрубок. Вероятность адсорбционно-десорбционного процесса была задана набором параметров $\{\chi\}$, которые могут меняться пользователем непосредственно в ходе виртуального эксперимента.

Через виртуальный эмиттер пропускалась "бесконечная" серия треугольных импульсов одинаковой амплитуды, что выводило состояние поверхности (распределение центров между состояниями с частицами и без) в квазистационарный режим, в котором форма вольт-амперной характеристики (ВАХ) от импульса к импульсу менялась исключительно за счёт стохастических флуктуаций.

Изменение величин параметров {χ} позволяет управлять формой результирующей ВАХ, расположенной между двумя крайними значениями (соответствуют полному покрытию эмиттера частицами и полному его очищению). Так что возможно получение форм гистерезиса близких к реально наблюдаемым [2].

Флуктуации ВАХ построенной в координатах Фаулера-Нордгейма отображаются на точечной диаграмме "наклон-отсечка" (SK-диаграмма), формируя на ней протяжённое облако значений, близкое по форме к наблюдаемым экспериментаторам диаграммам [3].

Модель позволяет также получать статические распределения эффективных параметров эмиттера (коэффициента усиления поля FEF и площади эмиссии AFE), которые имеют форму логнормального распределения и также близки по форме к экспериментальным данным [4].

Экспериментальные SK-диаграмма и статистика FEF меняются при изменении приложенного уровня напряжения, а также с изменением уровня вакуума [5]. Это позволяет связать параметры SK-диаграммы и статистики FEF с адсорбционно-десорбционными условиями на поверхности эмиттера и с его морфологией, включая построение градуировочной сетки, по которой можно определять эффективный коэффициент усиления поля эмиттера и его эффективную работу выхода [6, 7].

Представленная в работе модель позволяет связать экспериментальную методику анализа флуктуаций ВАХ с морфологией поверхности полевого эмиттера и объяснить (в будущем предсказать) поведение ВАХ при изменении вакуумных условий. В настоящее время ведутся работы по подбору параметров {χ}, необходимых для корреляции результатов модели и экспериментальных данных.

Список литературы

1. Liu Y., Wang G.-J., Wu Y.-J., Amphiphilicity and self-assembly behaviors of polystyrene-grafted multi-walled carbon nanotubes in selective solvents, Colloid Polym. Sci. 292, pp. 185 – 196, 2014;
2. Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Terukov E.I., Shchegolkov A.V., Tkachev A.G., Current-voltage characteristics of carbon nanostructured field emitters in different power supply modes, App. Surf. Sci. 424, pp. 239 – 244, 2017;
3. Kolosko A.G., Popov E.O., Filippov S.V., Romanov P.A., Исследование статистического разброса автоэмиссионных параметров многоострийных катодов на основе композита полимер−углеродные нанотрубки, Tech. Phys. Lett., 40(5), pp. 438 – 411, 2014;
4. Kolosko A.G., Popov E.O., Filippov S.V., Romanov P.A., Statistical dispersion of nanocomposite emission parameters, J. Vac. Sci. Technol. B 33(3), pp. 03C104-1 – 6, 2015;
5. Kolosko A.G., Popov E.O., Filippov S.V., Romanov P.A., Terukov E.I., Further investigation of statistical parameters of nanocomposite multi-tip emitters, IEEE 2015 28th International Vacuum Nanoelectronics Conference, Guangzhou, China, pp. 40-41, 2015;
6. Smirnov I.U., Kolosko A.G., Filippov S.V., Yudkina N.A., Popov E.O., Application of slope-intercept diagram to determine the parameters of the nanocomposite field emitters in-situ, Journal of Physics: Conference Series 741, pp. 012031-1 – 6, 2016;

7. Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Smirnov I.Yu., Исследование с применением SK-анализа вольт-амперных характеристик нанокомпозитных полевых эмиттеров на основе графена, Tech. Phys. Lett., 62(7), pp. 1097 – 1103, 2017.

Анализ регулярности микроскопических эмиссионных центров нанокомпозитного полевого катода

Буров А. Н.[1], Марков А. А.[1], Колосько А. Г.[2], Филиппов С. В.[2], Попов Е. О.[2]

[1]СПбГУТ
[2]ФТИ

Эл. почта: burov43alex@gmail.com

Полевая эмиссия была открыта в начале двадцатого века. Применяется в разработке ряда опытных энергосберегающих устройств, таких как дисплеи высокого быстродействия, рентгеновские трубки, клистроны, лампы бегущей волны, терагерцовые усилители и т.д. Совершенствование прототипов этих приборов требует высоких токов и стабильности полевого эмиттера. Наиболее высокие токи демонстрируют многоострийные нанокомпозитные структуры, однако применение их в техническом вакууме приводит к возникновению непредсказуемых стохастических процессов на их поверхности, вызванных адсорбцией частиц остаточной атмосферы. Даже в режиме стабильного токоотбора эти процессы приводят к возникновению шумов.

Представленная работа направлена на экспериментальное исследование флуктуаций токовых характеристик нанокомпозитного полевого катода с использованием компьютеризированного автоэмиссионного проектора и методики многоканальной регистрации вольт-амперных характеристик [1].

Для получения и обработки экспериментальных данных были использованы программы, написанные нами на базе платформы LabView 2016. Онлайн обработка картин свечения позволила получить временные зависимости яркости изображения каждого эмиссионного центра на люминесцентном экране проектора, синхронных с временными зависимостями общего эмиссионного тока.

В результате постобработки результатов эксперимента мы провели:

– анализ корреляции эмиссионного тока с яркостью эмиссионных центров для трёх видов автоэмиссионного эксперимента:

1) эксперимент при постоянном уровне приложенного напряжения и стабильном уровне тока (корреляция до 86%),

2) эксперимент при непроизвольно растущем уровне тока в нестабильном режиме полевой эмиссии (корреляция до 95%),

3) эксперимент при линейно растущем уровне напряжения и, соответственно, растущем уровне тока (корреляция до 99,7%);

– расчёт доли неучтенного эмиссионного тока из-за возникновения новых, незарегистрированных в начале эксперимента эмиссионных центров, который производился методами аппроксимации и экстраполяции экспериментального распределения центров по яркостям (доля составила около 7%);

– анализ регулярности токоотдачи эмиссионных центров, путём построения и обработки трёх видов зависимостей:

1) зависимость числа эмиссионных центров, обнаруженных на экране проектора, от времени (для получения распределения центров по частоте включения была произведена аппроксимация кривой и её дифференцирование),

2) гистограмма и соответствующая функция распределения регулярности, определённой по "скважности" временной зависимости яркости каждого центра от времени при заданном уровне яркости Y_0.

3) гистограмма и соответствующая функция распределения регулярности, определённой по степени флуктуации (среднеквадратического отклонения σ) яркости каждого центра.

– расчёт коэффициентов усиления поля эмиссионных центров по их максимальным яркостям, произведённый путём пересчёта яркостей в токоотдачу и решением обратного уравнения Фаулера-Нордгейма.

В результате проведённого анализа были получены численные оценки стабильности эмиссионной поверхности нанокомпозитного катода.

Показано, что эмиссионные центры, обладающие повышенной токоотдачей, обладают повышенным уровнем стабильности, что возможно вызвано их повышенной температурой.

Наиболее стабильные центры (Reg1 > 0,8) дают токовый вклад 95%. За шумовую составляющую отвечают менее стабильные и менее разогретые током центры.

Список литературы

1. Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Fedichkin I.L., Масс-спектрометрическая комплексная методика исследования полевых и термических свойств нанокомпозиционных материалов, Nanomaterials and Nanostructures — XXI, vol. 7, issue 1, pp. 14–26, 2016.

Исследование эффекта Парселла в структурах с Таммовским плазмоном с органической активной областью

Морозов К. М.[1,2], Иванов К. А.[2], Selenin N. [3], Mikhrin S.[3], de Sa Pereira D[4], Menelaou C.[4], Monkman A. P.[4], Kaliteevski M. A.[1,2,5].

[1]СПбАУ РАН
[2]ИТМО
[3]Innolume GmbH, Dortmund, Germany
[4]University of Durham, UK
[5]ФТИ

Эл. почта: morzconst@gmail.com

Нами было проведено теоретическое и экспериментальное исследование изменения времен радиационного затухания в структурах с Таммовским плазмоном с органической акивной областью. Таммовский плазмон — перспективное состояние электромагнитного поля, формирующееся на границе диэлектрического зеркала и металла, которое имеет ряд перспективных свойств [1-3], в том числе позволяет управлять скоростью спонтанной эмиссии, что было продемонстрировано недавно [4]. Исследуемая таммовская структура была образована путем термического осаждения слоев CBP(4,4′-Bis(*N*-carbazolyl)-1,1′-biphenyl) и серебра на подложку Ta_2O_5/SiO_2 брэггоского отражателя. Предварительно дизайн был сформирован с учетом расчетов, осуществленных с помощью формализма S-квантования [5]. Было экспериментально показано увеличение скорости затухания интенсивности флуоресценции органической молекулы CBP в толще структуры. Интегральный фактор Парселла оказался близким к 3.

Список литературы

1. M.E. Sasin, R.P. Seisyan, M.A. Kalitteevski, S. Brand, R.A. Abram, J.M. Chamberlain, A.Yu. Egorov, A.P. Vasil'ev, V.S. Mikhrin, A.V. Kavokin. Appl. Phys. Lett. 92 (25), 251112 (2008);
2. R. Brückner, A.A. Zakhidov, R. Scholz, M. Sudzius, S.I. Hintschich, H. Fröb, V.G. Lyssenko, K. Leo. Nature Photonics 6 (5), 322 – 326 (2012);
3. C. Symonds, G. Lheureux, J. P. Hugonin, J. J. Greffet, J. Laverdant, G. Brucoli, A. Lemaitre, P. Senellart, J. Bellessa. Nano Letters 13 (7), 3179 – 3184 (2013);
4. A.R. Gubaydullin, C. Symonds, J. Bellessa, K.A. Ivanov, E. D. Kolykhalova, M. E. Sasin, A. Lemaitre, P. Senellart, G.Pozina and M.A. Kaliteevski. Scientific Reports 7, 9014 (2017);
5. М.А. Калитеевский, А.Р. Губайдуллин, К.А. Иванов, В.А. Мазлин., Оптика и спектроскопия, 121(3), 446–456 (2016).

How fullerenes shell affects the vacancy decay in caged atoms

Amusia Miron Ya[1], Chernysheva Larissa V.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: amusia@012.net.il

The effect of the fullerenes shell C_N upon the probability of Coster-Kronig (*CK*) and super Coster-Kronig (s*CK*) transitions in a caged atom A, forming an endohedral A@C_N, is investigated. The CK and sCK decay in A inside C_N can be distinguished from other processes with the emitted particles from the A@C_N system by their specific transition energies and high intensities.

The presence of C_N modifies the decay energy, alters its probability, and opens new decay channels, by which the decay energy of a vacancy in A is carried away by one or more C_N electrons. As a result, the decay probability can by either suppressed due to interference of direct and indirect, with participation of C_N electrons, decay pathways, or enhanced up to 5-6 orders of magnitude, due to opening of new decay channels.

We will concentrate here also upon the role of the reflection of the outgoing decay electron by the static potential of the fullerenes C_N. We will demonstrate that this reflection affects impressively the decay probability and the shape of the outgoing electron spectra. As concrete examples calculations are performed for Ar@C_{60} $2s^{-1}$-$2p^{-1}3s^{-1}\varepsilon p$ and $2s^{-1}$-$2p^{-1}3p^{-1}\varepsilon d$ *CK* transitions and for the whole variety of CK transitions of $3s^{-1}$ — vacancy in Kr@C_{60} and $4s^{-1}$ – in Xe@C_{60} decays. Most of the transitions were affected considerably.

Влияние доменной структуры на сверхбыструю магнитную динамику, возбуждаемую лазерными импульсами

Храмова А.[1,2], Кожаев М. А.[2], Чернов А. И.[2], Пятаков А. П.[1], Савочкин И. В.[2], Белотелов В. И.[1,2]

[1]МГУ им. М. В. Ломоносова
[2]РКЦ

Эл. почта: ae.khramova@gmail.com

В настоящее время большой интерес для области оптических исследований представляют магнитоупорядоченные материалы. Это связано с прямыми и обратными магнитооптическими явлениями[1, 2]. Прямые магнитооптические эффекты представляют собой изменение оптических свойств материалов в магнитном поле. Так, с их помощью возможно управление оптическим излучением посредством контроля намагниченности материала. Обратные магнитооптические эффекты являют собой изменение магнитного порядка среды под действием электромагнитной волны. Таковые явления могут найти применения, например, в оптической записи магнитной информации и в спинтронных и магнонных технологиях.

Данная работа посвящена исследованию сверхбыстрой магнитной динамики в магнитоупорядоченной структуре, отличительной особенностью которой является наличие доменных границ. С этой целью в процессе измерений образец помещался в ненасыщающее магнитное поле. Эксперименты проводились методом накачка-зондирование. Суть метода состоит в использование двух сверхкоротких (порядка 100 фс) световых импульсов, идущих с небольшой задержкой друг относительно друга. Первый импульс используется для накачки – локального воздействия на намагниченность образца, второй, более слабый – для зондирования возникшей динамики намагниченности и магнитостатических спиновых волн.

Для исследования прецессии намагниченности и спиновых волн в качестве накачки использовались циркулярно-поляризованные фемтосекундные оптические импульсы. Посредством обратного эффекта Фарадея таковые импульсы в момент прохождения через среду создавали эффективное магнитное поле, приводящее к нарушению магнитного порядка в материалах. В качестве образцов использовались прозрачные пленки висмут-замещенного железо-иттриевого граната с анизотропией типа легкая ось и полосовой доменной структурой (характерный размер домена порядка 30 мкм). Установка была реализована по схеме балансного детектирования, которая способна детектировать малые сигналы на фоне различных шумов.

В работе было продемонстрировано влияние доменной границы на оптически возбуждаемые спиновые волны. Впервые была изучена сверхбыстрая магнитная динамика намагниченности в домене при воздействии сфокусированными лазерными импульсами, а также было изучено влияние лазерного импульса на доменную границу.

Решение данной задачи позволит решить масштабную проблему прецизионного и перестраиваемого управления намагниченностью на микромасштабах, что критически важно для развития спинтроники, магноники и методов записи и считывания информации на магнитных носителях.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-1615.2017.2

Список литературы

1. Chumak, A. V., et al. "Magnon spintronics." Nature Physics 11.6 (2015): 453-461.;
2. D. Stanciu et al., “All-Optical Magnetic Recording with Circularly Polarized Light,” Phys. Rev. Lett., vol. 99, no. 4, p. 47601, Jul. 2007.

Синтез методом молекулярно-пучковой эпитаксии и свойства III-V ННК на гибридных подложках SiC/Si

Резник Р. Р.[1]

[1]ИТМО

Эл. почта: moment92@mail.ru

Нитевидными нанокристаллами (ННК), или нановискерами (НВ), называют кристаллы с поперечным размером порядка 10−100 нм и длиной на порядок и более превосходящей поперечный размер. В последнее время нитевидные нанокристаллы привлекают особое внимание исследователей, что объясняется их уникальными свойствами. Такие уникальные свойства ННК связаны прежде всего с высокими значениями отношения высоты и диметра в нанометровом диапазоне размеров. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы, обладающие таким высоким соотношением размеров, имеют большие перспективы применения в различных микроэлектронных, оптоэлектронных и аналитических приборах. На основе таких ННК можно создавать полевые транзисторы (Si и Ge), гетеробиполярные транзисторы, фотовольтаические элементы и светоизлучающие устройства (III−V, Si-биосенсоры, сверхбыстрые интегральные схемы, электрооптические наносистемы и другие функциональные наноустройства.

В настоящее время ННК выращиваются в основном методами газофазной эпитаксии (ГФЭ) или молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на поверхностях, активированных каплями катализатора роста. Такие технологии выращивания позволяют интегрировать полупроводниковые приборы на основе A^3B^5 с кремниевой микро- и наноэлектроникой. Процесс формирования ННК состоит из следующих этапов. На первом этапе на подготовленную поверхность полупроводника (например, Si(111)) наносится каталитическое вещество (например, Au). На втором этапе система нагревается до температуры выше эвтектики и на поверхности образуются капли раствора материала подложки с катализатором (Au–Si). На третьем этапе производится осаждение полупроводникового материала (Si) на поверхность. При этом рост на поверхности под каплей происходит во много раз быстрее, чем на неактивированной поверхности, что и приводит к образованию одномерных ННК.

В данной работе для синтеза еитридных и других A^3B^5 нитевидных нанокристаллов методом молекулярно-пучковой эпитаксии были использованы гибридные подложки кремния ориентации (111) с нанометровым буферным слоем карбида кремния. Изучены структурыне и оптические свойства синтезированных наноструктур.

Features of the lasers characteristics of based on nitride quantum wells

Медведева Е. Е.[1], Коноплев С. С.[2], Савельев А. В.[2], Жуков А. Е.[2]

[1]СПбПУ
[2]СПбАУ РАН

Эл. почта: waylactealmed@gmail.com

Abstract

Numerical simulation of a quantum well on nitrides, optical interband transitions in low dimensional semiconductor structures (semiconductor quantum wells), conduction-heavy hole and transitions in quantum wells, refinement of the gain for a quantum well on nitride materials with allowance for the overlap integral.

Introduction

A numerical model was developed for solving the one-dimensional stationary Schrödinger equation and the search for allowable energy values for a quantum well on nitrides. During the calculations, spontaneous and piezoelectric polarizations of nitrides were taken into account, leading to a distortion of the profile of the quantum well on nitrides (in particular, $GaN/In_{0.7}Ga_{0.2}N/GaN$). The overlap integral of the wave functions was calculated, which makes it possible to more accurately calculate the characteristics of nitride lasers (including amplification, the probability of spontaneous emission and absorption, spontaneous emission).The rate of stimulated absorption and emission can be calculated by the formulas below:

$$R = \left(\frac{q}{m}\right)\left(\frac{n_p}{nn_g^M\varepsilon_0}\right)\left|\int dx[\psi_e]^*\psi_{hh}\right|^2 \frac{mE_p}{4}(n_x^2+n_y^2)f_v(1-f_c)\frac{m_{r^2}}{\pi h^2}\theta(h\omega-Ec-Ep);$$

$$R = \left(\frac{q}{m}\right)\left(\frac{n_p}{nn_g^M\varepsilon_0}\right)\left|\int dx[\psi_e]^*\psi_{hh}\right|^2 \frac{mE_p}{4}(n_x^2+n_y^2)f_c(1-f_v)\frac{m_{r^2}}{\pi h^2}\theta(h\omega-Ec-Ep);$$

Where $\int dx[\psi_e]^*\psi_{hh}$ is integral of overlap I, *nx,ny* — components of the electric polarization vector, *fc, fv* — Fermi function for electrons and holes, *Ec, Ep* — quantization energy level for electrons and holes, n_p — photon density, m — electron mass, n, n_g^M, Ep- constant, determined by the material parameters, m_r^2 — reduced mass, *q* — electron charge, ε_0 — dielectric constant, *h* — "h-bar" Planck's constant.

Through the values of the stimulated emission and absorption rates in this paper, we have calculated the attenuation and other laser characteristics. The work echoes the themes that affect the articles in the list of references [1-3].

Список литературы

1. O. Ambacher et al., Pyroelectric properties of Al(In)GaN/GaN hetero-and quantum well structures, J. Phys.: Condens. Matter 14, 3399–3434 (2002);
2. Pelá, R. R. at al., Accurate band gaps of AlGaN, InGaN, and AlInN alloys calculations based on LDA-1/2 approach, Appl. Phys. Lett., 2011, 98, 151907;
3. A. T. Meney, E. P. O'Reilly and A. R. Adams, Optical gain in wide bandgap GaN quantum well lasers, IOP Science, Semicond. Sci. Technol. 11 (1996) 897–903.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, ГИДРО- И АЭРОДИНАМИКА

AC plasma torch operating on a mixture of air and methane

Subbotin D. I.[1,2,4], Surov A. V.[1], Popov S. D.[1], Serba E. O.[1], Obraztsov N. V.[1,3], Spodobin V. A.[1], Popov V. E.[1], Kuchina J. A.[1]

[1]IEE RAS, RAS
[2]SPSIT, Russia
[3]SPbPU, Russia
[4]SPbU, Russia

Эл. почта: subbotin1987@mail.ru

The main method for obtaining hydrogen is reforming of natural gas with steam or oxygen [1]. The first process is endothermic:

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2O \quad (1)$$

The second process, due to the partial oxidation of natural gas, becomes exothermic:

$$2CH_4 + O_2 = 2CO + 4H_2 \quad (2)$$

At the same time, H_2/CO becomes less than 2. However, for the production of organic compounds by the Schiffer-Tropsch method, a molar ratio of $H_2/CO = 2$ or more is required. Therefore, the produced mixture of hydrogen and carbon monoxide (synthesis gas) undergoes additional catalytic conversion with steam:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 \quad (3)$$

This problem can be solved by supplying the electrical energy necessary to heat the mixture to the required process temperature. Reforming methane with thermal plasma was considered in a number of works: air-plasma reforming under the action of sliding arcs [2], steam-carbon dioxide reforming using the AC plasma torch [3].

In this paper, a high-voltage AC plasma torch with separate injections of a plasma-forming gas was considered [4]. The three-phase power supply consists of current-limiting inductors, reactive power compensators and a step-up transformer with an output voltage of 10 kV. In the near-electrode zone, air (shielding gas and oxidant) was supplied, and methane was fed into the arc zone. As a result, the chemical process proceeds according to the reaction (2). To prevent soot formation, the air excess ratio was 1.05. Flow rates of plasma-forming media: air is 4 g/s, methane is 0.8 g/s. After the plasma torch, a lined reactor containing a sample probe and several thermocouples is placed. The electrical power of the plasma torch was 63 kW, the reactor temperature during the process reached 1250 ° C. The power of the plasma torch depends on the total flow rates of plasma-forming gases and the proportion of methane. This is due to the

intensification of arc cooling by the vortex flow of a colder gas (especially when hydrogen is produced by reaction (2)). The obtained data indicate the possibility of regulating the power of the plasma torch when the composition of the plasma-forming gas changes.

Список литературы

1. Aasberg-Petersen K., Dybkjær I., Ovesen C.V., Schjødt N.C., Sehested J., Thomsen S.G., Natural gas to synthesis gas – Catalysts and catalytic processes, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 3, Is. 2, P. 423-459, 2011;
2. Lee D.H., Kim K.-T., Cha M.S., Song Y.-H., Optimization scheme of a rotating gliding arc reactor for partial oxidation of methane, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, Is. 2, P. 3344-3351, 2007;
3. Rutberg Ph.G., Kuznetsov V.A., Popov V.E. Popov S.D., Surov A.V., Subbotin D.I., Bratsev A.N., Conversion of methane by $CO_2 + H_2O + CH_4$ plasma, Applied Energy, Vol. 148, P. 159-168, 2015;
4. Rutberg Ph.G., Kuznetsov V.A., Serba E.O., Popov S.D., Surov A.V., Nakonechny Gh.V., Nikonov A.V., Novel three-phase steam–air plasma torch for gasification of high-caloric waste, Applied Energy, Vol.108, P. 505-514, 2013.

Metal ferrites syntesis by AC plasma torch

Kuchina J. A.[1], Subbotin D. I.[1,2,3], Kuznetsov V. E.[1], Popkov V. I.[2], Popov V. E.[1], Cherepkova I. A.[2], Obraztsov N. V. [1,4]

[1]IEE RAS, Russia
[2]SPSIT, Russia
[3]SPbU, Russia
[4]SPbPU, Russia

Эл. почта: yuulya@mail.ru

Ferrites of metals have found application in the manufacture of various ceramics [1]. The main methods for their production are hydrothermal [2] and glycine-nitrate synthesis [3]. In addition to these methods, there is information on the production of ferrites by the plasma from a mixture of metallic powders [4] and the corresponding oxides [5].

The report considers the plasma synthesis of metal ferrites from their aqueous solutions of nitrates. The experimental facility consists of a single-phase AC plasma torch and a reaction chamber into which aqueous solution of ferric nitrate (0.1 mol/l) is fed. In the reaction chamber, the air plasma is mixed with an aqueous solution. In this case, nitrate decomposes and forms a fine powder collected on a cooled metal surface:

$$4Fe(NO_3)_3=2Fe_2O_3+NO_2+3O_2$$

The particle size depends on the dilution of the solution, the size of the liquid droplets, and the residence time of the material in the reaction zone. The obtained material was studied by an X-ray diffractometer, an IR Fourier spectrometer, and a scanning electron microscope with an energy dispersive X-ray analysis. The basic composition of the powder is as follows: O —

59.65% mol, Fe — 34.58% mol, Ni — 0.35% mol, Cu — 0.86% mol, Cr — 0.89% mol., other metals — 2.61% mol. The presence of metal impurities is explained by the interaction of the electric arc with the plasma torch case (stainless steel) and electrodes (copper).

Список литературы

1. Alex Goldman, Modern ferrite technology, Springer Science+Business Media, Inc, p. 435, 2006;
2. Kuznetsova V.A., Almjasheva O.V., Gusarov V.V., Influence of microwave and ultrasonic treatment on the formation of $CoFe_2O_4$ under hydrothermal conditions, Glass Physics and Chemistry, Vol. 35, № 2. P. 205-209, 2009;
3. Zhernovoi A.I., Komlev A.A., D'yachenko S.V., Magnetic characteristics of $MgFe_2O_4$ nanoparticles obtained by glycine–nitrate synthesis, Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics, Vol. 61. № 2. P. 302-305, 2016;
4. Nawale A.B., Kanhe N.S., Raut S.A., Bhoraskar S.V., Das A.K., Mathe V.L. Investigation of structural, optical and magnetic properties of thermal plasma synthesized Ni-Co spinel ferrite nanoparticles, Ceramics International, Vol. 43, Issue 9, P. 6637-6647, 2017;
5. Mohai I., Szepvolgyi J., Bertoti I., Mohai M., Gubicza J., Ungar T. Thermal plasma synthesis of zinc ferrite nanopowders, Solid State Ionics, Vol.141-142, P.163-168, 2001.

Численное исследование процесса схлопывания парового пузыря в жидкости вблизи твердой стенки

Махнов А. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: a_makhnov@mail.ru

Процесс схлопывания паровых пузырей в жидкости играет важную роль для широкого круга прикладных задач. Кавитационная эрозия является одной из ключевых проблем, которые могут возникать при работе различных гидравлических устройств, лопаток гидротурбин, гребных винтов. Схлопывание кавитационных пузырей также лежит в основе технологии ультразвуковой очистки твердых поверхностей. Поэтому численное моделирование процесса схлопывания пузыря и распространения волны сжатия, возникающей в результате схлопывания, является очень актуальной задачей. Особенный интерес с точки зрения эрозионного воздействия представляет моделирование схлопывания пузыря, расположенного вблизи твердой стенки. Согласно представленным в литературе экспериментальным данным, локальные пики давления на стенке в подобных процессах могут достигать величины порядка 10^9 Па [1].

В данной работе сформулирована квазигомогенная модель кавитационных течений, основанная на предположении механического и термодинамического равновесия жидкой и паровой фаз. Жидкая фаза описывается в приближении слабо сжимаемой среды с

постоянной скоростью звука, для паровой фазы используется уравнение состояния совершенного газа. Для обеих фаз учитываются эффекты вязкости. Учет фазового перехода жидкость-пар входит в уравнение состояния баротропной среды, записанное для смеси и связывающее плотность и давление смеси.

Таким образом, полная система уравнений модели включает в себя уравнение переноса массы для смеси жидкость-пар, уравнение переноса импульса (также для смеси) и уравнение состояния смеси. Другими словами, решается система уравнений Навье-Стокса, дополненная моделью кавитации. Особенностью данного подхода является то, что модель кавитации не предполагает введения дополнительного уравнения переноса (как, например, в моделях [2, 3]), а только приводит к более сложному уравнению состояния. Уравнение переноса энергии в модель не входит, поскольку предполагается, что при схлопывании паровых пузырей, не содержащих неконденсируемого газа, изменения температуры малы и не оказывают существенного влияния на исследуемые процессы.

На основе сформулированной модели проведено численное исследование нестационарного сжимаемого течения, возникающего в процессе схлопывания сферического парового пузыря вблизи твердой стенки. Задача предполагается симметричной относительно оси, проходящей через центр пузыря и направленной по нормали к стенке. Поэтому расчеты выполнялись в двумерной постановке с использованием граничного условия осевой симметрии. При этом на стенке задавалось условие прилипания, а на открытых границах расчетной области использовались специальные неотражающие условия, построенные таким образом, что граница становится абсолютно прозрачной для приходящих на нее возмущений.

В качестве рабочей жидкости рассматривается вода при температуре 25ºC. Плотность воды в условиях насыщения при данной температуре составляет 997.01 кг/м^3, давление насыщенных паров — 3149 Па, скорость звука — 1498 м/с. Плотность пара соответствует выбранной температуре и равна 0.02287 кг/м^3. Начальный радиус парового пузыря равен 10 микрон, расстояние от центра пузыря до стенки — 12 микрон. Давление жидкости вокруг пузыря в начальный момент времени равно 101 325 Па.

Расчеты выполнены на базе открытой вычислительной среды OpenFOAM [4]. Система определяющих уравнений дискретизируется и решается по методу конечных объемов. Используется равномерная расчетная сетка с квадратными ячейками, шаг сетки по каждому из направлений равен 0.2 микрон.

Полученные в результате расчетов распределения гидродинамических параметров в области схлопывания пузыря (на разных стадиях процесса) демонстрируют адекватность модели и эффективность разработанного алгоритма.

Список литературы

1. Philipp, A., Lauterborn, W., Cavitation erosion by single laser-produced bubbles, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 361, pp. 75-116 (1998);
2. Kunz, R.F., Boger, D.A., Stinebirg, D.R., Chyczewski, T.S., Lindau, J.W., Gibel- ing, H.J., Venkateswaran, S., Govindan, T.R., A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction, Journal of Computers & Fluids, Vol. 29, pp. 849-875 (2000);

3. Schnerr, G.H., Modeling and computation of unsteady cavitating flows based on bubble dynamics, in Numerical Simulation of Incompressible Flows, ed. Hafez, M.M., World Scientific, pp. 544-576 (2003);
4. OpenFOAM: the open source CFD toolbox // URL: https://www.openfoam.com/.

Методика коррекции поля средней скорости вентиляционных течений: обоснование на основе расчетов по методу моделирования крупных вихрей

Засимова М. А.[1], Иванов Н. Г.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: zasimova_ma@spbstu.ru

При строительстве жилых комплексов и промышленных предприятий одной из проектных задач является разработка систем вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях. Инженерные методики расчета систем воздухообмена позволяют получить интегральные значения параметров микроклимата в рабочей части помещения. Для обеспечения комфортных условий необходимо также контролировать локальные распределения скорости, температуры и концентрации примесей. Детальные сведения о трехмерной структуре течения можно получить на основе численного решения осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса, замкнутых полуэмпирической моделью турбулентности (RANS подход). Применение RANS подхода дает информацию о поле модуля осредненной скорости, $V_m = (<V_x>^2+<V_y>^2+<V_z>^2)^{0.5}$, построенной по осредненным по времени значениям компонент скорости. Для оценки систем вентиляции, однако, необходимо иметь информацию о поле осредненных значений модуля скорости, $V_a = <(V_x^2+V_y^2+V_z^2)^{0.5}>$, которые могут существенно отличаться от величин V_m [1]. Различие значений V_a и V_m связано с высоким уровнем турбулентности, особенно в областях малых скоростей, где оно может превышать 50% [2]. В литературе [1 - 3] предложены полуэмпирические методики коррекции данных, получаемых при применении RANS подхода к расчетам вентиляции помещений, позволяющие проводить оценку поля V_a на основе рассчитанных полей V_m и кинетической энергии турбулентности, k. Проведение расчетов по методу моделирования крупных вихрей (LES) позволяет непосредственно получить актуальные и осредненные значения V_a и V_m, а также рассчитать k. Применяя корреляционные зависимости [1-3] к данным LES, можно оценить точность методик коррекции данных.

В настоящей работе оценка существующих методик коррекции поля средней скорости проводится на основе данных LES расчетов вентиляционного течения в прямоугольном помещении (высота H = 3 м, протяженность 3H). Под потолком помещения располагается щелевое входное отверстие, его высота равна h_{in} = 0.0056H, выходное отверстие, находящееся на противоположной стенке вблизи пола, имеет высоту h_{out} = 0.16H.

Геометрия помещения соответствует условиям тестового эксперимента [4], однако в настоящей работе рассматривается квазидвумерная постановка: ширина расчетной области составляет $H/6$, на торцевых границах ставится условие периодичности. На вход подается рассматриваемый как несжимаемая среда воздух (плотность ρ = 1.2 кг/м^3, динамическая вязкость $\mu = 1.79\times10^{-5}$ кг/мс) со средней скоростью V_{in} = 0.455 м/с, что соответствует числу Рейнольдса, равному $Re = h_{in}V_{in}/\nu$ = 5233. Расчеты проводились в пакете ANSYS Fluent 16.2. Построение расчетных сеток осуществлялось в пакете ANSYS ICEM CFD 16.2, в расчетах используются равномерные сетки размерностью 3, 8, 23 и 58 миллионов ячеек. Для моделирования турбулентности применялся подход Wall-Modeled LES (WMLES). Были привлечены ресурсы суперкомпьютерного центра «Политехнический», максимальное число ядер, использовавшихся при распараллеливании, составило 512.

Результаты показали, что в областях интенсивной генерации турбулентности (в слое смешения и в области разворота воздушной струи) различия между полями V_a и V_m в среднем составляют около 50%, а локально могут достигать 80%. В области ядра струи, где движение воздуха имеет выраженное направление, различия между V_a и V_m минимальны. Отличия значений V_a, рассчитанных по корреляционным зависимостям [1-3], от величин, полученных непосредственно в LES расчете, невелики: практически во всей области течения они не превышают 5%. Полученные результаты дают дополнительное обоснование необходимости коррекции результатов RANS расчетов вентиляционных течений.

Список литературы

1. Koskela H., Heikkinen J., Niemela R. and Hautalampi T. Turbulence correction for thermal comfort calculation. Building and Environment, vol. 36 (2), pp. 247-255, 2001;
2. Smirnov E.M., Ivanov N.G., Telnov D.S., Son C.H. and Aksamentov V.K. Computational Fluid Dynamics Study of Air Flow Characteristics in the Columbus Module. Proc. of the 34th Int. Conf. on Environmental Systems, SAE Technical Paper 2004-01-2500, pp. 1-8, 2004;
3. Popiolek Z. and Melikov A. Improvement of CFD predictions of air speed turbulence intensity and draught discomfort. Proc. of Indoor Air 2008: 11 Int. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, pp. 1-8, 2008;
4. Nielsen P.V., Restivo A., Whitelaw J.H. The velocity characteristics of ventilated room. ASME J. Fluids Engineering, vol. 100, pp. 291-298, 1978.

Особенности формирования плазменного канала в газе низкого давления при транспортировке низкоэнергичного электронного пучка в магнитном поле пробкотрона

Новицкий А. А.[1], Андреев В.В[1]

[1]РУДН

Эл. почта: temple18@mail.ru

В работах [1-2] показано, что режим гиромагнитного авторезонанса (ГА) может осуществляться без инжекции частиц в зону ускорения. Первичная плазма образуется непосредственно в самой зоне захвата в условиях ЭЦР-разряда. Данный метод накладывает ряд ограничений на возможность управления энергетическим спектром и числом захваченных частиц. С целью улучшения выходных параметров ускорителя предложена схема режима ГА с использованием внешнего инжектора холодной плазмы [3].

Целью данной работы является исследование динамики пространственной структуры, определение характеристик и параметров плазменного канала создаваемого при осевой инжекции в магнитное поле протяженной пробочной ловушки электронного пучка низкоэнергичных электронов.

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрический СВЧ резонатор (мода колебаний ТЕ118, резонансная частота 2,45 ГГц), помещенный в осесимметричное магнитное поле протяженной пробочной конфигурации (пробочное соотношение R=1.2, L=80 см) с индукцией магнитного поля в минимуме ловушки 1200 Гс, в одном из торцов установки располагается инжектор [3]. Модернизированный инжектора представляет собой электронно-оптическую систему: термокатод (LaB_6, d = 18 мм), прикатодный электрод Пирса, имеющий потенциал равный потенциалу катода и анод с отверстием диаметром d = 10 мм. Нагрев катода осуществляется косвенным нагревателем резистивного типа из танталовой фольги (h = 0.5 мм) и представляет собой диск диаметра d = 19 мм в котором выполнены технологические прорези, обеспечивающие необходимое омическое сопротивление (R = 0,08 Ом при T = 20 C) нагревателя. Разработанная конструкция обеспечивала эффективный нагрев катода до рабочих температур: 1500-1800° C. Для уменьшения термических нагрузок в конструкции инжектора реализована система водяного охлаждения катодно-анодного узла. Для реализации импульсно-периодического режима работы инжектора цепь анодного напряжения оснащена полупроводниковым модулятором.

В условиях рабочих давлений $P=5\cdot10^{-5}$- 1 10^{-5} Торр при взаимодействии пучка инжектируемых электронов с инертным газом в резонаторном объеме образуется приосевой плазменный канал с четким границами. Диаметр канала при изменении давления не превышал 10 мм. Измерения с помощью цилиндра Фарадея позволили определить интегральные характеристики пучка. Установлены зависимости тока пучка электронов от вытягивающего напряжения на аноде и величины давления в рабочем объеме. Так при напряжении на аноде 630 В.величина тока пучка составляет 40 мА, Торцевой многосеточный анализатора позволил установить энергетическое распределение электронов в

плазменном канале. Измерения были проведены как в непрерывном, так и импульсном режимах работы инжектора. Установленные пространственные характеристик плазменного канала и энергетического диапазона первичных частиц позволят определить критерии, обеспечивающие надежный захват частиц в режим ГА. Полученные результаты позволяют рассчитывать на увеличение выходных характеристик ускорителя с позиции увеличения числа захваченных частиц [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (No. 17–12-01470).

Список литературы

1. В.В. Андреев, А.А. Новицкий, А.М. Умнов, Д.В. Чупров// ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 1, с 86;
2. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, M. A. Korneeva, and A. M. Umnov // PLASMA PHYSICS REPORTS Vol. 43 No. 11, p 1114, 2017;
3. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, L. A. Vinnichenko, A. M. Umnov, and D. O. Ndong PLASMA PHYSICS REPORTS Vol. 42 No. 3, p.293, 2016.

Исследование режимов эффективной светоотдачи резонансного микроволнового разряда инертных газов в форвакуумном диапазоне давлений

Корнеева М. А.[1], Андреев В. В.[1]

[1]РУДН

Эл. почта: korneevama@mail.ru

Резонансный микроволновой разряд формировался в кварцевой колбе, расположенной в цилиндрическом резонаторе (TE_{111}, 2,45 ГГц), помещенном в магнитное поле пробочного типа (R= 1.36, L=4 см), создаваемого постоянными магнитами с системой магнитного замыкания. Изменение положения магнитов при помощи микрометрической подачи обеспечивало перестройку магнитного поля. Значение индукции магнитного поля в минимуме ловушки варьировалось от 750 до 950 Гс. Значение индукции магнитного поля, соответствующего резонансу 875 Гс. Рабочий диапазон давлений плазмообразующего газа изменялся в диапазоне от $1\cdot10^{-3}$ до 100 Торр. Откачка рабочего объема (кварцевая колба диаметр – 10 см и высота – 4 см) осуществлялась при помощи паромасляного насоса до фонового давления не хуже $1\cdot10^{-5}$ Торр. Импульсный режим работы магнетронного генератора (СВМ-150-1) обеспечивался модулятором, с частичным разрядом накопительной емкости. Длительность импульса составляла 2 мс, пауза – 8 мс. Показано [1], что в диапазоне рабочих параметров создается плотная ($n_e = 1\cdot10^{10}\div4\cdot10^{11}$ см$^{-3}$) низкотемпературная ($T_e = 3\div5$ эВ) плазма с высокой степенью ионизации ($1\cdot10^{-3}\div5\cdot10^{-5}$). Экспериментальная установка была оснащена рядом диагностических систем. Оптическая спектроскопия осуществлялась при помощи монохроматора-спектрографа MS3504i. Для измерения освещенности применялся аттестованный люксметр ТКА-ПКМ С051.

Измерение температуры и концентрации электронов производилось методом двойного электрического зонда.

Изменение давления плазмообразующего газа в широком диапазоне позволило изучить особенности формирования разряда в различных условиях. Был выявлен эффект «вторичного» зажигания, сопровождаемый скачкообразным ростом интенсивности светового потока. При прохождении первого порогового давления $P_1 \sim 5 \cdot 10^{-3}$ Торр освещенность, создаваемая разрядом, возрастает на порядок. Изменения в режиме генерации разряда так же хорошо прослеживаются и по уровню поглощаемой разрядом мощности: происходит рост с 70% до 90-95%. Повторно разряд начинает разгораться при давлении $P_2 \sim 0.9$ Торр (аргон) или $P_2 \sim 0.3$ Торр (гелий). Данный режим соответствует максимальному уровню светоотдачи разряда. Экспериментально зафиксированный максимум освещенности для аргона составил 1000 лк, для гелия – 500 лк. Несмотря на существенные изменения в уровне освещенности на давлении выше P_2, величина поглощенной разрядом мощности остается практически неизменной и составляет 90%. Зондовые измерение показывают рост концентрации электронов при переходе в режимы с эффективной светоотдачей. Так при значениях давления выше P_1 концентрация оказывается выше критической для рабочей частоты магнетрона ($7\ 10^{10}$ см$^{-3}$). Это становится возможным из-за толщины плазмы, сравнимой с глубиной проникновения СВЧ волны. При измеренной концентрации электронов $1 \cdot 10^{11}$ см$^{-3}$ характерная глубина проникновения составляет 3,3 см, что сравнимо с высотой колбы. Таким образом, при закритических концентрациях электронов на высоких рабочих давлениях волна все еще эффективно проникает в плазму. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют об обнаружении рабочего режима, обеспечивающего эффективное преобразование энергии СВЧ-волны в радиационные процессы в газоразрядной плазме инертных газов. Выявлены условия генерации и поддержания разряда с высокой светоотдачей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №3.2223.2017/4.6).

Список литературы

1. Andreev V.V. Plasma Physics Reports, 2017, Vol. 43, No. 11, 1119-1122.

Thermal energy confinement time scaling with Ip and BT in Globus-M H-mode

Киселев Е. О.[1], Patrov M. I.[1], Kurskiev G. S.[1], Bakharev N. N.[1], Gusev V. K.[1], Telnova A.Yu.[1], Khromov N. A.[1], Miroshnikov I. V.[1], Petrov Yu.V.[1], Sakharov N. V.[1], Minaev V. B.[1], Sladkomedova A. D.[1], Shchegolev P. B.[1], Solokha V. V.[1], Tokarev V. A.[1], Tolstyakov S. Yu.[1]

[1]Ioffe Institute, Russia

Эл. почта: nightkeo@gmail.com

The presentation is devoted to the thermal energy confinement study at the compact spherical tokamak Globus-M. Globus-M had major radius R = 0.36 m and minor radius a = 0.24 m (R/a ~ 1.5). The lower-null magnetic configuration is characterized by moderate elongation k~1.7 and triangularity δ~0.35. Special feature of the Globus-M tokamak is the extremely high input heating power density: ~0.6 MW/m^3 in pure ohmic heating (OH) and ~2.5 MW/m^3 under auxiliary heating by neutral beam injection (NBI). The range of temperatures achieved in Globus-M is $<T_{i,e}>$= 0.2 – 0.4 keV that leads to higher values of collisionality ν^*=0.03-0.4 and normalized ion gyroradius ρ^*~ 0.02-0.04 than in MAST and NSTX. The present study was performed in both OH and NBI heated H-mode plasmas. H-mode is the usual operational mode in Globus-M at moderate density range n_e>2-2.5·10^{19} m^{-3}. The regression fit of the database indicates strong τ_E dependence on both plasma current I_p and toroidal magnetic field B_T, while the dependence on n_e and absorbed power was similar to the conventional scaling IPB98(y,2). The original technique for calculating the absorbed power using both NUBEAM [1] and 3d fast-ion tracking algorithm [2] is discussed. Obtained profiles of the absorbed power were used to estimate electron and ion heat diffusivity using ASTRA simulation. It was found that the electron heat diffusivity is strongly affected by the plasma current and the toroidal magnetic field. The $B_T\tau_E$ dependence on ν* is found be similar to the one in NSTX and MAST, while q dependence is stronger than on MAST, but weaker than in ITER scaling.

Список литературы

1. A. Pankin et al., “The tokamak Monte Carlo fast ion module NUBEAM in the National Transport Code Collaboration library”, Comp. Phys. Comm. 159 (2004) 157;
2. Bakharev N.N. et al., Fast particle behaviour in the Globus-M spherical tokamak // Nucl. Fusion – 2015. – T. 55 – 55043023.

Получение абсолютно калиброванных спектров излучения Xe лазерной плазмы в диапазоне дальнего ультрафиолета для целей EUV литографии

Буторин П. С.[1], Калмыков С. Г.[2], Сасин М. Э.[2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ

Эл. почта: butorin_ps@mail.ru

В настоящее время широким фронтом ведутся исследования в области физики лазерной плазмы с целью разработки эффективного источника рабочего излучения для EUV (Extreme UltraViolet) литографии. Впервые идея использования Xe лазерной плазмы в качестве подобного источника с длиной волны 13.5 нм была предложена еще в конце прошлого века, тогда же были построены первые прототипы литографов, однако, их внедрение в промышленное производство до сих пор задерживается. Причиной является все еще недостаточная интенсивность излучения из источника, в котором вынужденно пришлось использовать мишень из твердого олова, и, как результат, большой поток загрязнений из него.

В 2013 году в ИФМ РАН было выдвинуто предложение о переводе EUV литографического процесса на длину волны 11.2 нм с использованием Xe плазмы, т. к. ожидается, что мощность ее излучения на новой длине волны будет в несколько раз превосходить мощность излучения на 13.5 нм как плазмы из ксенона, так и плазмы из олова. Предложение базируется на разработках в ИФМ многослойных интерференционных зеркал на длину волны 11.2 нм для оптической системы EUV литографа. Первые образцы таких зеркал были предоставлены в распоряжение ФТИ в 2016 г.

В настоящей работе представлены результаты абсолютно калиброванных измерений интенсивности излучения плотной Xe лазерной плазмы в диапазоне длин волн 11-14 нм с помощью двух поворотных брэгговских зеркал (Mo/Si и Be/Mo). Описана методика математической обработки первичных экспериментальных результатов. Полученные данные сопоставляются с ранее выполненными в ФТИ спектрографическими измерениями; подчеркивается хорошее соответствие двух групп результатов, полученных принципиально разными способами.

Результаты работы показывают, что интенсивность излучения лазерной Xe плазмы на длине волны 11.2 нм в 10 раз выше, чем на традиционной для EUV литографии длине 13.5 нм, что обещает хорошие перспективы дальнейшего развития EUV литографии.

Список литературы

1. N. I. Chkhalo and N. N. Salashchenko. AIP Advances. V. 3. 082130. 2013;
2. В. П. Белик и др..Письма в ЖТФ. Т. 43. Вып. 22. С. 10. 2017;
3. U. Stamm and K. Gäbel. In: EUV Sources for Lithography. V. Bakshi, ed.. SPIE Press, Bellingham, WA, USA.Chapter 19.2006.

Time dependent 2-dimensional model of an alternating current arc

Obraztsov N. V.[1,2], Frolov V. Ya.[1], Subbotin D. I.[2,3,4], Popov V. E.[2], Surov A. V.[2]

[1]SPbPU, Russia
[2]IEE RAS, Russia
[3]SPSIT, Russia
[4]SPbU, Russia

Эл. почта: nikita.obrazcov@mail.ru

Modelling of the arc discharge in the air between two electrodes was carried out. Modelling of magnetohydrodynamics is a complex task and considerable computing resources are required to solve it. In this case, a similar approach was used as in [1]. An incompressible laminar flow was considered but in this case the dependence of the density on temperature. In view of the fact that the modelling of a compressible and turbulent flow takes a very long time, a large number of time steps with a very small time interval are required [2, 3]. The simulation was carried out in Comsol Multiphysics, where the model is described by 11 equations. The equation of motion, which takes into account the Lorentz force and is supplemented by the continuity equation and by the equation of energy balance. The electromagnetic problem was described by a system of Maxwell's equations.

Five periods were simulated, 0.1 seconds with a time interval of 1 μs. It can be seen from the results that the establishment of the process takes from 2 to 2.5 periods. The temperature, velocity, and voltage drop distributions on the arc are obtained. The temperature in the arc lies in the range from 6500 to 8000 K. The model is compared with the dependence of density on temperature and constant density.

Список литературы

1. Obraztsov N.V., Frolov V.Ya., A two-dimensional axisymmetric model of an ac arc, 2018 IEEE Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering (EICONRUS), p.430-432, 2018;
2. Masaya Shigeta, Three-dimensional flow dynamics of an argon RF plasma with dc jet assistance: a numerical study, Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 46, Number 1, p.015401, 2013;
3. Masaya Shigeta, Turbulence modelling of thermal plasma flows, Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 49, Number 49, p. 493001, 2016.

Моделирование течения газа в разрядной камере при размыкании контактной системы в пакете OpenFOAM

Куракина Н. К.[1,2], Пинчук М. Э.[1], Будин А. В.[1], Смирновский А. А.[2]

[1]ИЭЭ РАН
[2]СПбПУ

Эл. почта: nkuriee@gmail.com

Исследованы процессы наполнения рабочим газом разрядной камеры при размыкании контактов в рабочем объеме разрядной камеры экспериментального стенда [1]. Подвижный контакт перемещается за счет давления нагнетаемого в камеру сверхзвукового потока сжимаемого газа при газовом дутье через дугу. Стенд предназначен для исследования дуговых процессов, эрозии электродов и деградации изоляционных материалов в газовых сильноточных выключателях тока. Для математического моделирования использовался открытый пакет OpenFOAM с подключенной библиотекой swak4foam. Описываются методы создания модели с элементами перестроения сетки с учетом модельных допущений. Приведены результаты расчета газодинамических параметров: поля давления, скоростей, температуры и их зависимости от времени. Исследовано выравнивание давления в камере при достижении необходимой скорости размыкания контактов для эффективного дугогашения в диапазоне 20-25 м/с к моменту времени 4 мс при величине давления наддува газа в пределах 2-3 МПа.

Работа проводилась в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №31 "Фундаментальные исследования физико-технических проблем энергетики". Работа также частично поддержана грантом РФФИ (проект 16-08-00767-а).

Результаты расчета получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Список литературы

1. Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Леонтьев В.В., Куракина Н.К., Экспериментальный стенд для исследования дуговых и эрозионных процессов в высоковольтных сильноточных выключателях, Приборы и техника эксперимента, No 6, с. 61–66, 2017.

Применение схемы с искусственной вязкостью для численного решения нестационарной квазиодномерной задачи о течении двухфазной среды по каналу на основе двухжидкостного подхода

Смирнов С. И.[1], Смирнов Е. М.[1], Булович С. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: sergeysmirnov92@mail.ru

Многожидкостный подход к описанию динамики гетерогенных сред базируется на модели вложенных континуумов, согласно которому каждая из фаз считается непрерывно распределенной по пространству. В частности, в случае двухжидкостного подхода квазиодномерная математическая модель нестационарного двухфазного потока в канале переменного сечения основывается на системе шести дифференциальных уравнений 1-го порядка, представляющей законы сохранения массы, импульса и энергии для каждой из фаз. Данная система не является замкнутой и требует привлечения дополнительного соотношения. Для замыкания системы наиболее часто используется допущение о равенстве давлений в фазах, что, однако, приводит к потере свойств гиперболичности системы уравнений. В литературе предлагаются различные способы восстановления гиперболических свойств, приводящие в итоге к изменению собственных векторов матрицы Якоби. Однако данные подходы приводят к искажению скорости распространения возмущений в среде и, как следствие, неправильному описанию волновых процессов. Другим замыкающим соотношением может служить дифференциальное уравнение переноса объемной доли одной из фаз [1]. Введение данного уравнения переноса делает систему гиперболичной, но при этом требуется назначение таких характеристик, как скорость переноса объемной доли и время релаксация поля давления, которые априори неизвестны. Ситуация усложняется при переходе к рассмотрению большего числа фаз в потоке.

В настоящей работе проблема потери гиперболичности системы уравнений сохранения в рамках допущения о равенстве давления в фазах обходится посредством использования системы дифференциальных уравнений с дополнительными членами, искусственно вводящими эффект вязкости [2-3]. Благодаря введению повторных производных от искомых функций, система дифференциальных уравнений становится параболической по времени, и начально-краевая задача Коши корректно разрешима.

Рассматривается модельная задача о двухфазном течении в трубе переменного сечения с варьированием начальных данных. Исследуется влияние добавления искусственной вязкости различного уровня на получаемое численное решение и переходный процесс установления. Показывается, что в случае исходной системы (без повторных производных) при некоторых сочетаниях начальных данных и схемных факторов возникают интенсивные нефизические осцилляции искомых переменных и, как следствие, «развал» решения. Добавление вторых производных обеспечивает устойчивый процесс получения численного решения при сохранении физически адекватного описания динамики потока.

Список литературы

1. Baer M.R., Nunziato J.W. A Two-Phase Mixture Theory for the Deflagration-to-Detonation Transition (DDT) in Reactive Granular Materials // J. Multiphase Flow. Vol. 12. Pp. 861–889. 1986;
2. Roache P.J. Computational Fluid Dynamics. Hermosa Publs., Albuquerque. 446 pp. 1976;
3. Булович С.В., Смирнов Е.М. Опыт использования численной схемы с искусственной вязкостью для решения задачи о распаде разрыва, сформулированной для многожидкостной модели среды // Восьмые Поляховские чтения: Тезисы докладов Международной научной конференции по механике, Санкт-Петербург, 30 января – 2 февраля 2018 г. – СПб.: Издательство СПбГУ. С. 100–101. 2018.

Экспериментальное исследование динамического сопротивления плазмы лазеров тлеющего разряда

Киселев А. С.[1], Смирнов Е. А.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: askiselev@etu.ru

Излучение лазеров тлеющего разряда обладает высокими значениями временной нестабильности, что обусловлено влиянием различных факторов. К таким факторам относятся как конструктивные особенности ЛТР, так и процессы, протекающие в активной газовой среде лазера. Решением данной проблемы является использование ЛТР совместно с системами активной стабилизации мощности их излучения [1]. Одним из вариантов стабилизации мощности лазерного излучения является регулировка уровня накачки таким образом, что мощность излучения остается на фиксированном уровне. В лазерах тлеющего разряда этот процесс сводится к противофазному изменению разрядного тока. Данный способ стабилизации может быть реализован в виде модификации блока питания лазера, и не требует дополнительных оптических элементов. При этом стоит отметить, что разрядный промежуток ЛТР является нелинейным элементом токовой цепи, и принудительное изменение тока разряда требует знания динамических характеристик плазмы разрядного промежутка [2].

Экспериментальное изучение динамических характеристик газового разряда путем возмущения разряда внешним гармоническим сигналом. В целях снижения влияния модуляции на параметры разряда глубина модуляции не превышала 5-10 %. Для определения динамического сопротивления разряда и возможности построения его годографа в комплексной плоскости необходимым является экспериментальное определение переменных составляющих тока и напряжения на разрядной трубке, а также сдвига фаз между ними. Для учета влияния паразитных элементов схемы производилась калибровка. При калибровке параллельно межэлектродному промежутку лазера в отсутствии разряда

подключалось эквивалентное сопротивление с низким значением паразитных реактивных параметров. По указанной методике измерялись величины сигналов, пропорциональных току и напряжению на разряде, и разность фаз между ними. Далее определялся калибровочный коэффициент и опорная разность фаз, позволяющие рассчитать истинные значения данных величин. Для измерения переменных составляющих тока и напряжения использовались усилители электрических сигналов на базе операционных усилителей. Коэффициент усиления мог варьироваться путем изменения номинала резистора в цепи обратной связи. Сдвиг фаз измерялся при помощи измерителя разности фаз Ф2-13.

Исследование динамических свойств разряда проводилось при помощи вакуумной установки, включающей специально разработанные макеты разрядных трубок различного диаметра, систему откачки и наполнения макетов. Управление вакуумной установкой осуществляется с помощью стеклянных кранов. Система наполнения содержит баллоны с гелием, неоном, углекислым газом и азотом. Макеты соединяются с вакуумной системой, позволяющей производить их откачку и наполнение, а также варьировать газовое наполнение и рабочее давление. Вакуумная система включает форвакуумный и масляный фракционный высоковакуумный насосы, баллоны с гелием, неоном, азотом и углекислым газом, а также систему регистрации давления [3, 4].

Для автоматизации процесса анализа поведения импеданса разряда и повышения наглядности отображения результатов была разработана программа в среде программирования MS Visual C#. Она позволяет производить расчет активной, реактивной составляющих, модуля импеданса, также строить годограф импеданса. Перед расчетом пользователю предоставляется возможность выбора типа газовой смеси, задания разрядных условий, диапазона изменения тока разряда и частоты сигнала. Результатом расчета является семейство зависимостей составляющих импеданса от частоты при различных токах разряда [5]. Каждое семейство зависимостей располагается на отдельной вкладке. Анализ расчетных и экспериментальных данных показывает, что погрешность измерений динамического сопротивления не превышает 10 %.

Список литературы

1. Привалов В.Е., Смирнов Е.А. Стабилизация мощности излучения лазеров тлеющего разряда и их применение (обзор). Оптико-механическая промышленность. 1986. №11. С. 52-60;
2. Смирнов Е.А. Динамические характеристики тлеющего разряда в протяженных трубках. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2013, №10, с. 6-10;
3. A. S. Kiselev, D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov, E. A. Smirnov. Determination of the plasma parameters of a glow discharge in long tubes // Journal of Physics: Conference Se-ries. 2017. Vol. 789. P. 012027;
4. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М.: Издательство «Наука», 1971. 490 с.;
5. A. S. Kiselev, E. A. Smirnov. Determination of the plasma impedance of a glow discharge in carbon dioxide // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 872. P. 012050.

Энергетический подход к анализу лабораторных установок высокоскоростного метания для изучения физических процессов при высоких давлениях

Быков Н. В.[1]

[1]МГТУ им. Н. Э. Баумана

Эл. почта: nik.bkv@gmail.com

В настоящее время в мире ведется работа по поиску путей совершенствования методов ускорения тел и их теоретического и экспериментального изучения. Можно выделить следующие классы или типы схем разгона макротел: одно- и многокамерные газовые (пневматические) установки, осуществляющие ускорение тел сжатым газом; классическая артиллерия (к которой отнесем и пороховые баллистические установки, работающие на том же принципе), в которых ускорение тел происходит за счет расширения пороховых газов при горении пороха; бикалиберные (цилиндроконические) установки с гидродинамическим эффектом, представляющие собой комбинированные установки, использующие пороховые газы для разгона сборки и деформацию пластического поршня в сужающемся (как правило, коническом) участке ствола для доразгона метаемого тела; легкогазовые баллистические установки – комбинированные установки, использующие пороховой разгон и сжатие легкого газа (обычно водород или гелий) для достижения высоких значений абсолютных скоростей (выше 10 км/с для тел массой в доли грамма); электродинамические ускорителя индукционного или рельсового типа, в которых применяется электромагнитное поле для разгона тел; установки взрывного ствольного метания, использующие взрывчатые вещества вместо порохов; другие экзотические виды ускорителей (на жидких метательных веществах, многокамерные орудия и т.п.).

При этом ключевыми моментом является фактор достижения предельных возможностей современными метательными установками. Это значит, что принципиально возможности повышения скорости за счет простых методов исчерпаны. Исключение составляют экзотические методики доускорения – такие как использование двухпоршневой легкогазовой пушки (Twin-gun) [1] или дополнительного детонационного кольца на выходе из нее [2]. На этой стадии особенную роль приобретает теоретическое исследование и моделирование процессов, позволяющее глубже вскрыть закономерности получения высоких скоростей и в частности подобрать оптимальные параметры. Возникший в последнее время всплеск интереса к теоретическому моделированию классических артиллерийских систем и пороховых баллистических установок это только лишний раз подтверждает.

В то же время наиболее важная практическая область, связанная с достижением высоких скоростей для тел "реальной" массы, в десятки и сотни граммов (в дальнейшем для тел такой массы используется термин "макротело") затронута в исследованиях в настоящее время очень слабо. В этой области нужно использовать свои методы ускорения, которые требуют и отдельных методов исследования — как теоретических, так и экспериментальных, поскольку разгон макротел в установках типа легкогазовых или

электромагнитных требует слишком больших затрат энергии и является очень дорогостоящим. По сути единственный стабильный существующий на данный момент способ ускорения макротел — классическая пороховая баллистическая установка, выходная скорость макротела в которой имеет теоретический предел в 1.9 — 2.0 км/с. При этом экспериментальный предел обычно ниже на 10%. Например, перстпективным по занятию этой ниши являются работы по внедрению нового метода ускорения макротел, основанного на доразгоне с помощью гидродинамического эффекта. Этот способ позволяет получить скорости более 2.3 – 2.5 км/с, а это является существенным шагом вперед в развитии метательных установок простой конструкции. Схема является простой и эффективной, не требующей больших вложений средств и может быть легко получена путем небольшой доработки существующих артиллерийских систем и пороховых баллистических установок. Она позволяет увеличить скорость метания существующих установок на 20-30%. Также интересной и перспективной схемой, модифицирующей классический вариант, является использование присоединенных камер подгона.

В настоящей работе проводится исследование эффективности разгона макротел в лабораторных установках с точки зрения критерия энергоэффективности.

Список литературы

1. Putzar R., Schaefer F. Concept for a new light-gas gun type hypervelocity accelerator // Int. J. of Impact Engineering, Vol. 88, 2016, Pp. 118-124;
2. Shi-Cao Z., Zhen-Fei S., Xiao-Ping Z. A Potential Approach to Launch Hypervelocity Projectiles up to 10km/s Based on Two-stage Gas Gun Facilities // Proc. Engineering, Vol. 58, 2013, Pp. 98-109.

Экспериментальные методы исследования эффекта электронного охлаждения

Безверхний Н. О.[1,2], Бобашев С. В.[1,2], Монахов Н. А.[1], Сахаров В. А.[1]

[1]ФТИ
[2]СПбПУ

Эл. почта: nikolaybezverhny@gmail.com

Тепловая защита летательного аппарата, движущегося с гиперзвуковой скоростью в атмосфере Земли, остается одной из основных проблем космической и авиационной отраслей [1]. Используемые в настоящее время пассивные методы теплозащиты связаны с заметным увеличением веса летательного аппарата и, как следствие, ограничением массы полезного груза, выводимого на орбиту. В последние десятилетия рассматриваются альтернативные методы тепловой защиты, основанные на использовании электрического и магнитного полей с целью воздействия на поток ионизованного газа в окрестности летательного аппарата. Однако, на значительной части траектории спуска возвращаемого космического аппарата и гиперзвукового летательного аппарата нагрев осуществляет-

ся преимущественно за счет излучения. В таких условиях необходимо осуществлять более интенсивный теплоотвод, чем могут позволить пассивные методы теплозащиты. Одним из таких методов активной теплозащиты является электронное охлаждение, при котором воздействие осуществляется непосредственно на нагретую поверхность летательного аппарата. В основе метода лежит явление термоэлектронной эмиссии, сопровождающееся остыванием имитирующей поверхности за счет уноса энергии электронами.

Экспериментальное исследование эффекта электронного охлаждения, применительно к летательным аппаратам является сложной задачей. В настоящий момент по данной тематике проводятся только теоретические работы, связанные с численными оценками и математическим моделированием. Первые работы в которых был описан способ генерации электрического тока при помощи термоэмиссионных материалов на поверхности гиперзвукового летательного аппарата появились еще в 1960-х годах [2, 3]. В этих работах проводится анализ и экспериментальное исследование новой конструкции термоэлектронного генератора электрического тока для летательных аппаратов, но не обсуждается возможность применения термоэмиссионных материалов для активной теплозащиты электронным охлаждением. Начиная с 2014 года проводятся исследования по численному моделированию эффекта электронного охлаждения, расчет эффективности переноса энергии электронами при различных внешних условиях и геометрических параметрах модели [4-8]. В этих работах показано, что при определённых условиях можно надеяться на снижение температуры поверхности до 40%.

В данной работе рассмотрены полученные на сегодняшний день результаты исследований эффекта электронного охлаждения. Рассмотрена возможности экспериментального изучения явления электронного охлаждения на базе плазмогазодинамической установки в ФТИ им А. Ф. Иоффе. Предложены экспериментальные методы измерения температуры образца из термоэмиссионного материала, подвергающегося интенсивному нагреву, в условиях приближенных к гиперзвуковому полёту.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках проекта 18-38-00346 мол_а.

Список литературы

1. Ivett A. Leyva. The relentless pursuit of hypersonic flight. Physics Today, Vol 70 (11), 2017, p. 30;
2. K. J. Touryan. A Hypersonic Plasma Power Generator, AIAA Journal, Vol. 3, No. 4, 1965, p. 652-659;
3. A. R. LeBlank, W. W. Grannemann. Thermionic Generator for Re-Entrv Vehicles, Proceedings of the IEEE, November, 1964, pp. 1302-1310;
4. Hicham Alkandry, Kyle M. Hanquist, Iain D. Boydz. Conceptual Analysis of Electron Transpiration Cooling for the Leading Edges of Hypersonic Vehicles. AIAA 2014-2674, 16-20 June 2014, Atlanta, GA, 11th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference;
5. Kyle M. Hanquist, Iain D. Boyd. Comparisons of Computations with Experiments for Electron Transpiration Cooling at High Enthalpies. AIAA 2015-235, 22-26 June 2015, Dallas, TX, 45th AIAA Thermophysics Conference;

6. Kyle M. Hanquist, Kentaro Haray, Iain D. Boydz. Modeling of Electron Transpiration Cooling for Hypersonic Vehicles. AIAA 2016-4433, 13-17 June 2016, Washington, D.C., 46th AIAA Thermophysics Conference;
7. Kyle M. Hanquist, Kentaro Haray, Iain D. Boydz. Evaluation of Computational Modeling of Electron Transpiration Cooling at High Enthalpies. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 31, No. 2 (2017), pp. 283-293;
8. Kyle M. Hanquist, Iain D. Boyd. Computational Analysis of Electron Transpiration Cooling for Hypersonic Vehicles. AIAA 2017-0900, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum.

Влияние внешней цепи на устойчивость состояний диода Пирса

Кузнецов В. И.[1], Герасименко А. Б.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: victor.kuznetsov@mail.ioffe.ru

В [1] предложен генератор переменного тока на основе термоэмиссионного преобразователя энергии (ТЭП), работающего в кнудсеновском режиме, где частицы движутся в межэлектродном промежутке диода без столкновений. Для получения переменного тока во внешнюю цепь диода включается индуктивность, на которой происходит накопление энергии. В определенные моменты времени в диоде развивается электронная неустойчивость. При этом ток в диоде резко обрывается, и накопленная на индуктивности энергия передается на нагрузку в виде импульса напряжения. В связи с этим важной задачей является изучение влияния внешней индуктивности на развитие неустойчивости в плазме диода.

Ранее в [2] было доказано, что стационарные состояния кнудсеновского ТЭП в режиме с монотонными распределениями потенциала с хорошей точностью аппроксимируются состояниями диода Пирса, в котором моноэнергетический поток электронов летит через однородный фон неподвижных ионов. Доклад посвящен результатам исследования влияния внешней индуктивности на дисперсионные ветви диода Пирса. Обнаружено, что наличие индуктивности во внешней цепи диода приводит к появлению новой дисперсионной ветви, имеющей положительный инкремент на частотах выше плазменной. Определены величины индуктивности, при которых возникают новые ветви.

Список литературы

1. Babanin V.I., Ender A.Ya., Kolyshkin I.N., Kuznetsov V.I., Sitnov V.I., ParamonovD.V., Next generation solar bimodal systems. 32nd IECEC, Honolulu, USA. p.427, 1997;
2. Ender A.Ya., Kuznetsov V.I., Kuhn S., The Pierce-diode approximation to the single-emitter plasma diode. Phys. Plasmas, 11, 13, p.113506, 2006.

Исследование влияния внешнего электрического поля на функцию распределения ионов в слабо ионизованном газе для различных сечений рассеяния

Герасименко А. Б.[1], Бакалейников Л. А.[1], Флегонтова Е. Ю.[1,]

[1]ФТИ

Эл. почта: gerasimenko.alexander@mail.ioffe.ru

В докладе рассмотрена задача о расчете функции распределения малой примеси ионов на фоне равновесно распределенных по скоростям атомов при наличии электрического поля. В отличие от ранее выполненных расчетов, где рассматривались модельные потенциалы взаимодействия, в данной работе расчет проведен для более широкого класса моделей. Функция распределения определялась с помощью прямого решения уравнения Больцмана моментным методом, который заключается в преобразовании уравнения Больцмана в систему дифференциальных уравнений, что достигается разложением функции распределения и интеграла столкновений по функциям Барнетта [1]. Проведение расчетов для широкого спектра моделей стало возможно благодаря разработанному нами методу вычисления матричных элементов (МЭ) интеграла столкновений, основанному на рекуррентной процедуре, которая позволяет последовательно отыскивать коэффициенты разложения изотропных матричных элементов интеграла столкновений по омега-интегралам [2, 3]. Найденные изотропные МЭ используются для построения неизотропных МЭ в ходе второй рекуррентной процедуры. Предлагаемый подход позволяет решать моментным методом целый класс кинетических задач для произвольных скоростных зависимостей сечений рассеяния.

Представлены результаты расчетов ФР, а также первых ее моментов, для нескольких скоростных зависимостей сечения рассеяния и проведено сравнение с известными экспериментальными результатами.

Список литературы

1. Эндер А.Я., Эндер И.А. Интеграл столкновений уравнения Больцмана и моментный метод, СПб.: Изд-во СПбГУ, 224с., 2003;
2. Эндер И.А., Бакалейников Л.А., Флегонтова Е.Ю., Герасименко А.Б., Рекуррентная процедура построения неизотропных матричных элементов интеграла столкновений нелинейного уравнения Больцмана. ЖТФ, 87, 1297-1302, 2017;
3. Эндер И.А., Бакалейников Л.А., Флегонтова Е.Ю., Герасименко А.Б., Изотропные матричные элементы интеграла столкновений уравнения Больцмана, ЖТФ, 62, 24-34, 2017.

Структура вихревого течения в бифуркации кровеносного сосуда: сопоставление результатов пациент-ориентированных расчетов и клинических доплеровских измерений

Гатаулин Я. А.[,2], Юхнев А. Д.[2], Зайцев Д. К.[2], Смирнов Е. М.[2], Куликов В. П., Кирсанов Р. И.[4]

[2]СПбПУ
[3]КрасГМУ
[4]АГМУ

Эл. почта: yakov_gataulin@mail.ru

Используемый в настоящее время пациент-ориентированный подход к моделированию кровотока учитывает индивидуальные характеристики пациента, измеренные клинически [1-3]. Однако, исследования, нацеленные на валидацию используемых моделей посредством сравнения с клиническими измерениями структуры кровотока, практически не встречаются.

Целью настоящей работы является сопоставление вихревых структур кровотока, измеренных клинически ультразвуковым доплеровским методом и рассчитанных численно для персонифицированной модели бифуркации сосуда.

Ангиографическое исследование пациента показало, что рассматриваемая бифуркация сонной артерии обладает существенной пространственной кривизной, атеросклеротическая бляшка располагается на внутренней сонной артерии практически осесимметричным образом, перекрывая сосуд на 95% по площади, что соответствует случаю сильного стеноза (сужения сосуда).

В результате клинических измерений ультразвуковым сканером в режимах цветного доплеровского картирования получены поля осевой и поперечной компонент скорости в поперечных сечениях общей сонной и внутренней сонной артерии перед, внутри и после стеноза. Обнаружены участки одновихревого (закрученного) и двухвихревого течения. В режиме импульсного доплера измерены временные кривые осевой и поперечной компонент скорости.

Использованная в расчетах трехмерная геометрическая модель бифуркации сонной артерии построена на основе указанного ангиографического исследования пациента. Использованные в качестве граничных условий для вычислительной модели распределения скорости потока на границах бифуркации (сонной артерии и ее ветвях) определялись по результатам клинических доплеровских измерений.

Отметим особо, что в соответствии с данными измерений на входе задавался закрученный профиль скорости. Для моделирования турбулентности выбраны уравнения Рейнольдса с моделью турбулентности k-ω SST, так как, согласно оценкам, в сильном стенозе создаются условия для турбулентного течения. Нестационарные трехмерные расчеты проводились с применением программы ANSYS CFX 16.2. Стенки модели рассматривались как жесткие.

В результате расчета получены трехмерные поля осевой и окружной скорости, которые обрабатывались так, чтобы получить расчетные аналоги компонент скорости, измеренных с помощью ультразвукового доплеровского метода.

Сравнение полей осевой и поперечной компонент скорости, полученных из клинических измерений и посредством пациент-ориентированного расчета, показало качественное и количественное совпадение данных.

Было установлено, что в начале стеноза в поперечных сечениях наблюдаются скорости, направленные к центру сосуда, что характерно для конфузорного потока. Сразу за стенозом развивается течение с двойным вихрем, а вниз по потоку от стеноза — одновихревое течение, соответствующее закрученному движению крови.

В рассматриваемом пульсирующем потоке (на участке одновихревого движения) максимум окружной скорости запаздывает по времени относительно максимума осевой скорости. Этот факт может быть связан с возникновение второго максимума на временной кривой осевой скорости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №15-01-07923 и №18-01-00629).

Список литературы

1. Arthurs C.J., Lau K.D., Asrress K. N. et al. A mathematical model of coronary blood flow control: simulation of patient-specific three-dimensional hemodynamics during exercise, Am J Physiology — Heart and Circulatory Physiology, Vol. 310, No.9, p.1242–1258, 2016;
2. Patel S., Usmani A.Y., Muralidhar K. Effect of aorto-iliac bifurcation and iliac stenosis on flow dynamics in an abdominal aortic aneurysm, Fluid Dynamics Research, Vol.49, p.1-29, 2017;
3. Gataulin Y.A., Zaitsev D.K., Smirnov E.M., Yukhnev A.D. Numerical study of spatial-temporal evolution of the secondary flow in the models of a common carotid artery, St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics, Vol.3, No.1, p.1-6, 2017.

Исследование параметров газоразрядной ячейки высокого давления в импульсном режиме работы

Юрченков М. И.[1], Рыков А. А.[1]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: miyurchenkov@gmail.com

Исследование параметров газоразрядной ячейки невозможно без понимания и представления о понятии газового разряда. Газовый разряд – совокупность процессов, возникающих в результате протекания электрического тока через вещество, которое находится в газообразном состоянии. Для того, чтобы стало возможно протекание тока необхо-

дима достаточная ионизация газа, которая происходит за счёт столкновений электронов с атомами газа. В результате возникает лавинное увеличение числа заряженных частиц, поскольку в процессе ионизации образуются новые электроны, которые тоже после ускорения начинают участвовать в соударениях с атомами, вызывая их ионизацию.

Для работы с газоразрядной ячейкой высокого давления в импульсном режиме необходимо учитывать ряд параметров, таких как время запаздывания, формирования и гашения разряда. Данные временные параметры зависят от ряда факторов, для времени запаздывания разряда: 1) степень интенсивности радиоактивного либо космического излучения; 2) условия ионизации атомов первичными и вторичными электронами; 3) интенсивность исчезновения электронов в межэлектродном промежутке.

– времени формирования разряда: 1) перераспределение напряженности поля в газоразрядном промежутке; 2) нарастание коэффициента вторичной электронной эмиссии γ;

– времени гашения разряда (восстановления электрической прочности прибора): 1) род газа и его давление; 2) размеры междуэлектродного промежутка; 3) Остаточное напряжение на электродах.

Также необходимо учитывать длительность, частоту и форму импульсов.

Для исследования процессов, протекающих в газоразрядном промежутке, и выявления вышеперечисленных факторов, использовалась элементарная газоразрядная ячейка, с определенным газовым наполнением и определенным давлением. Данный тип ячейки, при различных наполнениях, позволил отработать методику и исследовать импульсные параметры ее работы.

Список литературы

1. Барченко В. Т. и др. Физика и технология плазменных эмиссионных систем. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: СПб, 2014. 262 с.;
2. Фролов В. Я., Лисенков А. А., Барченко В. Т. Физические основы применения низкотемпературной плазмы. СПГПУ: СПб, 2010. 221 с.

Численное моделирование изменения аэродинамического сопротивления тела при подводе энергии в зоне перед ним

Мисюрина В. А.[1], Поняев С. А.[2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ

Эл. почта: s.poniaev@gmail.com

В настоящее время в гиперзвуковой аэродинамике одной из общеобсуждаемых и сложных проблем является изменение картины течения у летящего тела для изменения силы сопротивления или теплового потока. Постановка экспериментов со сверхзвуковыми потоками очень трудоемка и требует специального оборудования, поэтому численные методы решения таких задач находят широкое применение. Течения со сверх-

звуковыми скоростями представляют определенную сложность при расчетах, т.к. переход к дозвуковому течению обычно происходит с возникновением скачков уплотнения (ударных волн), где происходит резкое изменение параметров течения. Положение и форма ударной волны при обтекании тела сверхзвуковым потом в значительной степени определяет характеристики газа вблизи тела, а, следовательно, величину силы сопротивления. Существуют различные способы управления течением при сверхзвуковом обтекании тела. В работах [1, 2] рассматривается управление положением ударных волн, аэродинамическим сопротивлением, а также подъемной силой при помощи магнитогидродинамического воздействия. К немеханическим способам воздействия также можно отнести плазменное и тепловое [3, 4].

В настоящей работе рассматривается тепловое воздействие на характеристики обтекания закругленного тела, причем зона энерговыделения находится у закругленной части тела за ударной волной. Численное моделирование течения производится путем решения системы уравнений Навье-Стокса, дополненной уравнением баланса энергии и замыкающим соотношением для совершенного газа (уравнением Клапейрона-Менделеева). Расчеты были выполнены в свободно распространяемом пакете OpenFOAM, который позволяет решать различные задачи гидрогазодинамики методом конечных объемов.

Задача решалась в двух постановках: плоскосимметричной и осесимметричной, а также при двух различных размерах зон энерговыделения. Объемная плотность выделяемой энергии постоянна во всех расчетах и равна $9.95 \cdot 10^6$ Вт/м^3, приток тепла происходит в течение времени 0.0001 с. В качестве значений параметров в нулевой момент времени берется сошедшееся стационарное решение без энерговыделения.

При наличии энергоподвода происходит перестройка течения вблизи тела, и ударная волна отходит дальше от поверхности тела. Такой эффект наблюдается для обеих геометрий задачи: плоскосимметричной и осесимметричной.

Наибольшие значения температуры на поверхности тела в обоих случаях наблюдаются, как и ожидается, на закругленной части тела, у которой и происходит объемное выделение энергии. Была рассчитана сила давления как интеграл давления, которое вносит вклад в силу сопротивления, по поверхности закругленной части тела. Оказалось, что сила давления практически не изменилась по сравнению с расчетом без энерговыделения (отличия не превосходят 5%). Анализ полученных данных показал, что в задачах при отсутствии энерговыделения распределение давления по поверхности тела мало отличается от распределения давления в задачах с малой и большой зоной энерговыделения.

Таким образом, можно сделать вывод, что в наших условиях постановки задачи энерговыделение вблизи поверхности тела за ударной волной приводит к отходу ударной волны дольше от поверхности тела и увеличению температуры вблизи поверхности тела, но не приводит к значительному изменению силы сопротивления. Для получения большего влияния на распределение давления у поверхности тела можно было бы увеличить объемную плотность выделяемой энергии или время воздействия, но это приво-

дит к сильному росту температур, что возникает необходимость учитывать плазменные эффекты и не позволяет использовать модель совершенного газа.

Список литературы

1. Лапушкина Т.А. Сверхзвуковое обтекание тела при воздействии электрического и магнитного полей/ Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В, Поняев С.А. //Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. В. 5. С. – 28-34;
2. Лапушкина Т.А. Изменение давления у поверхности обтекаемого сверхзвуковым потоком тела магнитогидродинамическим методом/ Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В, Поняев С.А. //Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. В. 7. С. – 24-29;
3. Azarova O.A. An approach of drag force decrease for combined cylinder AD bodies under the action of microwave and laser energy deposition/ Azarova O.A., Knight D.D.// Aerospace Science and Technology. – 2017. – 64. – 154–160;
4. Азарова О.А. Сравнение плазменного и теплового воздействий на сверхзвуковое обтекание аэродинамического тела/ Азарова О.А., Ерофеев А.В, Лапушкина Т.А.// Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43. В. 8. – С. 93-101.

Применение рельсового ускорителя плазмы для исследования и модификации поверхности твердых тел

Твердохлебов К. В.[1,2], Поняев С. А.[2], Куракин Р. О.[2], Жуков Б. Г.[2]

[1]СПбГТИ
[2]ФТИ

Эл. почта: s.poniaev@gmail.com

Рельсовый ускоритель (рельсотрон, railgun) широко применяется для ускорения макроскопических тел и генерации сверхзвуковых плазменных струй. В данной работе экспериментально исследованы варианты применения рельсового ускорителя плазмы с целью изменения поверхностных свойств (элементного и фазового состава, структуры, геометрии) и испытания поверхности.

Обнаружено, что плазменный рельсотрон способен генерировать сверхзвуковые струи плазмы, как чистой, так и насыщенной микроскопическими частицами. Такие струи способны вызывать плазменно-механическую эрозию поверхности и переносить на поверхность материал рабочего канала рельсотрона.

В экспериментах по ионоплазменному рельсотронному напылению были получены медные и углеродные покрытия на поверхности различных материалов — стекол (натрий-силикатных, боросиликатных, кварцевых) и металлов (меди, нержавеющей стали, алюминия).

В экспериментах по плазменно-механическому испытанию поверхностей были получены образцы стекол, металлов и полимеров, поврежденных сверхзвуковой струей плазмы с примесью твердой или капельной фазы разной природы (медь или углерод).

Все полученные образцы были исследованы методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, получен элементный состав поверхности методом электроннозондового микроанализа.

Полученные результаты могут быть полезны в машиностроении, материаловедении и электронной промышленности.

Анализ возможностей алгебраических моделей ламинарно-турбулентного перехода

Стабников А. С.[1], Гарбарук А. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: an.stabnikov@gmail.com

Несмотря на то, что для большинства интересных с практической точки зрения задач число Рейнольдса оказывается достаточно высоким для обеспечения турбулентного характера течения, в таких задачах часто встречаются области, в которых поток является ламинарным. В этом случае высокая точность предсказания важных технических характеристик течения, таких как коэффициент подъёмной силы и коэффициент сопротивления, невозможна без учета и правильного описания перехода от ламинарного режима течения к турбулентному.

На настоящий момент наиболее точными и универсальными считаются дифференциальные модели ламинарно-турбулентного перехода, в рамках которых решаются уравнения переноса характеристик, позволяющих определить положение и характер перехода, в сочетании с уравнениями для турбулентных характеристик (k, ε, ω, ν_t). В частности, модель перехода SST γ-Re_θ [2], являющаяся на настоящий момент наиболее популярной моделью в своем классе, позволяет обеспечить высокую точность предсказания положения перехода в присоединенных пограничных слоях. Однако, несмотря на свои достоинства, модель [2] обладает рядом недостатков, связанных со сложностью и нелинейностью её формулировки, что зачастую приводит к численным проблемам при её использовании.

В последнее время стали появляться алгебраические модели перехода, которые не опираются на дополнительные уравнения переноса величин, определяющих положение перехода. К таким моделям, в частности, относятся модели k-ω KD [3] и SA BC [4], результаты тестирования которых, представленные в оригинальных работах, выглядят многообещающе. К сожалению, в силу новизны этих моделей, результаты их независимого тестирования в литературе пока отсутствуют.

Цель настоящей работы – выяснить, способны ли более простые модели [3] и [4] демонстрировать приемлемые результаты в широком круге переходных течений, тем самым избавляя от необходимости использования сложных громоздких моделей (таких как, например, SST γ-Re_θ) и значительно сокращая время расчёта.

В докладе будет представлены результаты расчетов широкого круга турбулентных течений с использованием моделей [2-4], а также проведен сравнительный анализ точности этих моделей.

Список литературы

1. Rumsey C.L., Spalart P.R. Turbulence Model Behavior in Low Reynolds Number Regions of Aerodynamic Flowfields. 38th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. AIAA-2008-4403. 2008;
2. Menter F.R., Langtry R.B. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes. AIAA J. 47(12), 2984-2906. 2009;
3. Kubacki S., Dick E. An algebraic model for prediction of bypass and separation-induced transition in turbomachinery boundary layers. 11th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements. p.1-6. 2016;
4. Cakmakcioglu S.C., Bas O., Kaynak U. A correlation-based algebraic transition model. J Mechanical Engineering Science, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. DOI: 10.1177/0954406217743537. 2017.

RANS и зонный RANS-IDDES расчеты эволюции турбулентного следа за пластиной под воздействием неблагоприятного градиента давления

Гусева Е. К.[1], Травин А. К.[1], Burnazzi M.[2], Knopp T.[2]

[1]СПбПУ
[2]DLR, Göttingen

Эл. почта: katia.guseva@inbox.ru

В работе представлены результаты расчетов следа за плоской пластиной, развивающегося в условиях неблагоприятного градиента давления (НПГ), создаваемого плоским диффузором (аналогичное экспериментальное исследование проведено в работе [1]).

Интерес к данному течению обусловлен, главным образом, тем, что течения такого типа реализуются при обтекании так называемого механизированного крыла (МК), представляющего собой трехэлементную конфигурацию (основное крыло, предкрылок и закрылок) и предназначенного для увеличения подъемной силы современных самолетов при взлете и посадке: эволюция аэродинамических следов предкрылка МК и основного крыла происходит под воздействием сильного НПГ, возникающего при обтекании закрылка. Для оптимизации МК на стадии его проектирования требуются многовариантные расчеты, которые в настоящее время проводятся с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), замкнутых с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности. Однако данные о точности этих моделей при расчете турбулентного следа в условиях НПГ крайне ограничены. Именно это определи-

ло цель данной работы, состоящую в оценке точности существующих RANS моделей турбулентности применительно к рассматриваемому классу течений. Для получения такой оценки расчеты были выполнены как с использованием четырех современных RANS моделей турбулентности (двух моделей линейной вязкости [2, 3] и двух дифференциальных моделей переноса Рейнольдсовых напряжений DRSM [4, 5]), так и в рамках гораздо более общего и надежного, но требующего несопоставимо больших вычислительных ресурсов вихреразрешающего гибридного RANS-LES подхода (зонный метод RANS–IDDES [6-8]). Сопоставление полученных при этом результатов свидетельствует о том, что ни одна из рассмотренных RANS моделей не обеспечивает приемлемой точности расчета, причем часть из них значительно занижает, а часть – завышает влияние НПГ на основные характеристики потока в ближнем следе. Отмечается, что полученная в результате RANS–IDDES расчетов детальная информация о статистических характеристиках следа может быть использована для создания и калибровки усовершенствованной DRSM модели турбулентности.

Список литературы

1. Driver, D.M., Mateer, G.G., Evolution of a Planar Wake in Adverse Pressure Gradient, NASA/TM–2016-219068, 2016;
2. Spalart P.R., Allmaras S.R., A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, AIAA Paper 1992-0439, Jan. 1992;
3. Menter, F.R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal, v.32, pp.1598–1605, 1994;
4. Eisfeld B., Rumsey C.L., Togiti V., Verification and Validation of a Second-Moment-Closure Model, AIAA Journal, V. 54, No. 5, pp. 1524-1541, 2016;
5. Jakirlic S., Hanjalic, K., A new approach to modelling near-wall turbulence energy and stress dissipation, Journal of Fluid Mechanics, V.459, pp. 139-166, 2002;
6. Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M.Kh, Travin, A.K., A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 29, pp. 1638-1649, 2008;
7. Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M.Kh, Travin, A.K., Synthetic Turbulence Generators for RANS-LES Interfaces in Zonal Simulations of Aerodynamic and Aeroacoustic Problems, Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 93, No. 1, pp. 63-92, 2014;
8. Shur, M., Strelets, M., Travin, A., Improved embedded approaches: Acoustically adapted versions of STG, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 134, pp. 62-69, 2017.

Тестирование вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности применительно к течению Куэтта с градиентом давления

Никифорова Кристина[1], Гусева Е. К.[1], Гарбарук А. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: bkv.nikiforova@gmail.com

В последние годы все большую популярность приобретают гибридные вихреразрешающие подходы поскольку они обеспечивают высокую точность расчета турбулентных течений при умеренных вычислительных затратах. В частности, для расчета пристенных течений все чаще применяется метод моделирования крупных вихрей с пристенным RANS моделированием (Wall-Modeling Large Eddy Simulation – WMLES). Однако, в силу своей относительной новизны, эти методы еще недостаточно хорошо изучены и нуждаются в тестировании на различных течениях. Настоящая работа посвящена проверке точности нескольких WMLES подходов применительно к пристенным течениям с продольным градиентом давления.

Тестирование проводилось на примере течения между двумя бесконечными пластинами, двигающимися в противоположные стороны (течение Куэтта), при наличии продольного перепада давления. Выбор этого течения был, с одной стороны, обусловлен его простотой, а с другой стороны – наличием в литературе данных прямого численного моделирования при различных градиентах давления [1, 2].

Расчеты проводились в прямоугольной области размером $4\pi h \times 2h \times 2\pi h$, где $h = 1$м – полувысота канала. При этом использовалось несколько расчетных сеток, размер которых составлял от 7.8 до 18 миллионов ячеек. Были рассмотрены два WMLES подхода, а именно метод IDDES и алгебраический WMLES, построенный на базе моделей Прандля и Смагоринского [3]. Достоверность результатов подтверждается тем, что расчеты были выполнены с использованием двух вычислительных кодов: коммерческого пакета Fluent и академического кода NTS.

В докладе будут представлены сравнительный анализ точности различных WMLES подходов для расчета пограничных слоев с градиентом давления, а также рекомендации по выбору расчетной сетки для решения таких задач с помощью WMLES.

Список литературы

1. Coleman, G. N., Garbaruk, A. V., & Spalart, P. R. (2015). Direct Numerical Simulation, Theories and Modelling of Wall Turbulence with a Range of Pressure Gradients. Flow, Turbulence and Combustion, 95(2–3), 261–276;
2. Coleman, G. N., Pirozzoli, S., Quadrio, M., & Spalart, P. R. (2017). Direct Numerical Simulation and Theory of a Wall-Bounded Flow with Zero Skin Friction. Flow, Turbulence and Combustion, 99(3-4),553-564;
3. Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., & Travin, A. K. (2008). A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. International Journal of Heat and Fluid Flow, 29(6), 1638–1649.

Тестирование SST-HL модели турбулентности для расчета обтекания крыловых профилей в широком диапазоне углов атаки

Матюшенко А. А.[1], Гарбарук А. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: alexey.matyushenko@gmail.com

Задача точного определения аэродинамических характеристик крыловых профилей крайне важна как для авиационной промышленности и ветроэнергетики, так и для энергомашиностроения. Расчеты этих характеристик выполняются, как правило, в рамках осредненных уравнений Рейнольдса в сочетании с полуэмпирическими моделями турбулентности. Однако, даже при использовании наиболее совершенных из современных моделей турбулентности наблюдается существенное рассогласование результатов расчета и эксперимента при углах атаки, соответствующих срыву потока на стороне разряжения (ошибка может достигать 25% [1]).

В работе [2] была предложена модификация SST модели [3] турбулентности SST-HL, которая с одной стороны существенно улучшает точность предсказания коэффициента подъемной силы при отрывных режимах обтекания крыловых профилей, и в то же время не уступает в точности оригинальной SST модели при расчете таких базовых турбулентных течений, как пограничный слой на плоской пластине. Целью настоящей работы является тестирование SST-HL модели при обтекании серии крыловых профилей для углов атаки вплоть до массированного отрыва с передней кромки.

В работе рассмотрены крыловые профили различной толщины и формы: S805, S809, S814, S825, DU-96-W-180, DU-97-W-300. Обтекание крыльев постоянного сечения и конечного размаха на базе этих профилей в широком диапазоне углов атаки было исследовано экспериментально [4-8] в аэродинамических трубах прямоугольного сечения с низким уровнем турбулентности ($I < 1\%$) при относительно высоких числах Рейнольдса, построенных по скорости набегающего потока и хорде профиле ($\mathrm{Re} > 10^6$) и низких числах Маха ($\mathrm{Ma} < 0.2$).

Расчеты проводились в рамках двумерных и трехмерных уравнений Рейнольдса для несжимаемой жидкости с учетом стенок аэродинамической трубы на неструктурированных гексагональных расчетных сетках, обеспечивающих сеточно-независимое решение.

Результаты расчетов продемонстрировали убедительное преимущество модели SST-HL над оригинальной моделью SST. Так, аэродинамические характеристики исследуемых профилей хорошо согласуются с экспериментом при углах атаки вплоть до массированного отрыва потока с передней кромки. Таким образом, результаты тестирования подтверждают высокую точность модели SST-HL применительно к расчету обтекания крыльев в широком диапазоне углов атаки.

Список литературы

1. Матюшенко А.А., Котов Е.В., Гарбарук А.В., Анализ причин снижения точности при расчете обтекания крыловых профилей в рамках двумерных уравнений

Рейнольдса, Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Физико-математические науки, Т. 10, № 1, С. 20-30, 2017;
2. Матюшенко А.А., Гарбарук А.В., Ментер Ф.Р., Смирнов П.Е., Модификация SST модели турбулентности для повышения точности расчета обтекания крыловых профилей, Седьмая российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-7), 2018;
3. Menter, F. R., Kuntz, M., Langtry, R. B., Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, In Turbulence, heat and mass transfer 4 (Vol. 4), edited by K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Begell House, Inc., pp. 625–632, 2003;
4. Somers D.M., Design and Experimental Results for the S805 Airfoil, NREL/SR-440-6917, January 1997;
5. Somers D.M., Design and Experimental Results for the S809 Airfoil, NREL/SR-440-6918, January 1997;
6. Somers D.M., Design and Experimental Results for the S814 Airfoil, NREL/SR-440-6919, January 1997;
7. Somers D.M., Design and Experimental Results for the S825 Airfoil, NREL report, NREL/SR-500-36346, January 2005;
8. Timmer W.A., R. P. J. O. M. van Rooij, Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils, J. Sol. Energy Eng 125(4), 488-496,Nov 26, 2003.

Модовый анализ альфвеновских волн в плазме токамака ТУМАН-3М

Абдуллина Г.[1], Аскинази Л. Г.[1], Белокуров А. А.[1], Жубр Н. А.[1], Корнев В. А.[1], Лебедев С. В.[1], Разуменко Д. В.[1], Тукачинский А. С. [1]

[1]ФТИ

Эл. почта: abdullina@mail.ioffe.ru

Актуальность исследования альфвеновских волн (АВ) в токамаках обусловлена их способностью приводить к ухудшению удержания быстрых частиц и возможному выбросу таких частиц на стенку камеры [1]. Обычно альфвеновские неустойчивости в токамаках возбуждаются энергичными ионами, движущимися со скоростями несколько превышающими альфвеновскую скорость. Такие ионы как правило возникают при нагреве плазмы с помощью инжекции пучка нейтральных атомов или при ее нагреве электромагнитными волнами радиочастотного диапазона. В омическом режиме таких ионов в количестве, достаточном для возбуждения альфвеновских волн, быть не должно. В токамаках ТУМАН-3М [2] и COMPASS [3] в омическом режиме с убегающими электронами недавно были обнаружены альфвеновские волны. В настоящее время единой теоретической модели, способной объяснить причины возбуждения АВ в отсутствие энергичных ионов, насколько нам известно, не существует. В связи с этим экспериментальные исследования структуры и особенностей возбуждения альфвеновских мод в омическом режиме представляют фундаментальный интерес.

В докладе представлены результаты экспериментального исследования пространственной структуры АВ при помощи массива магнитных зондов. Массив зондов установлен внутри камеры токамака и представляет собой шестнадцать зондов, расположенных в одном полоидальном сечении и равномерно распределенных по полоидальному углу, и два зонда, разнесенных в тороидальном направлении. Катушки ориентированы таким образом, чтобы измерять возмущение полоидального магнитного поля. Все зонды и усилители идентичны, что позволяет провести фазовый и амплитудный анализ сигналов на зондах. Информация о полоидальной структуре наблюдаемых АВ позволят сделать предположения о возможных типах возбуждаемых мод. Более ранние исследования [2, 4] свидетельствуют о глобальном характере моды — Global Alfven Eigenmode. Сравнение амплитуд сигналов на разных зондах массива дает информацию о зависимости возмущения магнитного поля, вызываемого АВ, от полоидального угла [5], что дополняет проведенную ранее работу по определению локализации альфвеновских колебаний по радиусу [4].

Исследование модовой структуры АВ, в совокупности с информацией об их локализации и амплитудах будет способствовать выявлению физических механизмов возбуждения альфвеновских волн в омическом режиме.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 16-12-10285) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Список литературы

1. Heidbrink W.W., Basic physics of Alfvén instabilities driven by energetic particles in toroidally confined plasmas, Phys. Plasmas, 15, p.055501, 2008;
2. Тукачинский А.С., Аскинази Л.Г., Балаченков И.М. и др., Альфвеновские колебания в омических разрядах с убегающими электронами в токамаке ТУМАН-3М, Письма в ЖТФ, том 42, вып. 24, с. 72, 2016;
3. Markovic T. et al, Alfvén-character oscillations in ohmic plasmas observed on the COMPASS tokamak, Proc. 44th EPS Conf. on Plasma Phys., p.5.140, 2017;
4. Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А. и др., Определение локализации альфвеновских колебаний в плазме токамака ТУМАН-3М, Письма в ЖТФ, том 44, вып. 3, с.47, 2018;
5. Heidbrink W.W. et al, An investigation of beam driven Alfvén instabilities in the DIII-D tokamak, Nucl. Fusion, 31, p.1635, 1991.

Тепловые и электрофизические свойства композитных керамик со структурой перовскита, легированных магнитными ионами

Мыльников И. Л.[1], Семёнов А. А.[1], Дедык А. И.[1], Павлова Ю. В.[1], Буровихин А. П.[1], Пахомов О. В.[2], Анохин А. С.[2]

[1]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
[2]ИТМО

Эл. почта: mylnikov.il@gmail.com

Сегнетоэлектрическая керамика на основе твёрдых растворов титанатов бария – стронция (BSTO) благодаря своим физическим свойствам и возможности их варьирования при изменении соотношения Ba/Sr находит широкое применение для создания различных электрически управляемых элементов в технике СВЧ. Легирование керамики марганцем с высокой концентрацией (5 – 30) мол. % открывает новые возможности применения этих материалов из-за ферромагнитных свойств марганца. При определенной концентрации Mn в BSTO исследуемые структуры могут давать отклик на воздействие магнитного поля, т.е. проявлять свойства мультиферроиков [1]. Современные исследования ряда мультиферроиков указывают на перспективность таких материалов для создания сенсоров магнитного поля, устройств записи и считывания информации, устройств спинтроники, а также для создания твердотельных охлаждающих устройств принципиально нового типа. Последнее из перечисленных применений развивается наиболее активно. Твердотельное охлаждение с использованием электрокалорического эффекта в сегнетоэлектрических материалах и мультикалорического эффекта в материалах со свойствами мультиферроиков является многообещающей альтернативой традиционным принципам работы охлаждающих устройств на паровом сжатии [2, 3]. Под мультикалорическим эффектом [4] понимают технологию охлаждения посредством воздействия на керамический элемент электрическим и магнитным полями, т.е. использование в одном устройстве как электрокалорического, так и магнитокалорического эффектов [5]. Твердотельные технологии охлаждения особенно важны для микроэлектронных устройств и микроэлектромеханических систем, благодаря возможной миниатюризации, высокой эффективности и низкой стоимости керамических материалов [6]. Поэтому разработка и исследование материалов со свойствами, характерными как для магнетиков, так и для сегнетоэлектриков в отдельности, а также связанными с взаимодействием магнитной и электрической подсистем являются актуальными в настоящее время.

В работе проведены исследования температурных зависимостей диэлектрических свойств и теплоёмкости, а также механизмов электропроводности плоскопараллельных конденсаторных структур на основе керамики титаната бария (BTO) и керамики титанатов бария — стронция (BSTO), легированных магнитными ионами марганца. Измерены вольт-фарадные и вольтамперные характеристики структур, сделана оценка сопротивления исследуемых материалов. Исследовано влияние электрического поля на диэлектрическую проницаемость образцов. Весь комплекс измерений проводился для различных – достаточно высоких концентраций марганца: 5, 10, 15 мол. %. Данные о диэлектрических и тепловых свойствах СЭ керамики с высокой концентрацией ионов Mn в литературе отсутствуют.

Образцы в виде дисков диаметром 10-12 мм и толщиной до 1 мм изготавливались по стандартной керамической технологии при температурах спекания 1300 °C-1500 °C. На шлифованные поверхности методом термического испарения в вакууме наносились медные электроды для измерения диэлектрических характеристик.

Температурные измерения ёмкости проводились с помощью прецизионного измерителя LCR Agilent E4980A. Образец закреплялся в специальном держателе, помещенном в климатическую камеру. Измерения проводились в температурном диапазоне от -60 °C до 150 °C при скоростях изменения температуры 0,001…200 К/мин. Для измерения ВАХ использовался универсальный вольтметр-электрометр В7-30 и блок питания GPR-100H05D. Максимальное значение напряжения на образцах составляло 1000 В. Точность измерения ёмкости составляла 0.05% пФ. Исследования теплофизических свойств керамических образцов проводились с использованием универсального дифференциального сканирующего калориметра Netzsch DSC 204 F1.

Список литературы

1. Semenov A.A., Dedyk A.I., Nikitin A.A., Artifical multiferroic structures based on barium-strontium titanate, J. of Materials Science, Vol. 51, pp. 7803 – 7813, 2016;
2. Sanlialp M., Molin C., Shvartsman V.V., Gebhardt S., Lupascu, D.C., Modified Differential Scanning Calorimeter for Direct Electrocaloric Measurements, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, Vol. 63, №10, pp. 1690-1696, 2016;
3. Yang Bai, Kai Ding, Guang-Ping Zheng, San-Qiang Shi, Lijie Qiao, Entropy-change measurement of electrocaloric effect of BaTiO3 single crystal, Phys. Status Solidi A 209, No. 5, 941–944, 2012;
4. Бродянский В.М., Синявский Ю.В., О возможности создания холодильных установок на основе электрокалорического эффекта, Холодильная техника, №. 7, С. 24-29, 1982;
5. Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M.I., Petrov V.M., Tatarenko A.S., Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate, Physical Review B, Vol. 70, № 6, p. 064416, 2004;
6. Lu S.G., Zhang Q., Electrocaloric materials for solid-state refrigeration, Advanced Materials, Vol. 21, №19, pp. 1983-1987, 2009;
7. Ненашева Е.А., Канарейкин А.Д., Дедык А.И., Павлова Ю.В., Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST-Mg для применения в ускорительной технике, Т. 51, №8, с. 1468—1471, 2009.

Photo-voltaic effects in the metal-ferroelectric-metal sandwich structure

Perkov Y. O.[1], Ivanov V. I.[1]

[1]Far Eastern State Transport University, Russia

Эл. почта: valivi@mail.ru

There are a series of nonequilibrium phenomena in ferroelectrics, which do not have a definite theoretical description[1]. In paper[2] the thermovoltaic effect consisting in initiation of the electric voltage between the opposite faces of the semiconductive sample of samarium sulphide (SmS) on heating to 400−500 K is described. The effect has appeared in the presence of the donor impurity concentration gradient directed towards these faces.

In our work[3] the thermally-stimulated quasi-stationary current arising only in the highly-alloyed with iron crystal of lithium niobate with the evaporated electrodes from a pair of different metals was described. A sign of the thermovoltaic response is determined by location of electrodes applied by vacuum evaporation on the opposite faces of crystal and does not depend on orientation of the crystallographic axes of the sample in reference to electrodes.

In this paper the results obtained in experimental studies of the light induced currents in the thin-layer metal-lithium niobate-metal (MLM) structure are presented. This effect is similar to photovoltaic effect, but it includes the thermal contribution. The possible models of the investigated phenomena are discussed.

The samples of doped lithium niobate crystals (iron concentration is equal 0.3 wt%) with different pairs of electrodes were studied. The metal electrodes were applied by vacuum evaporation with thickness varying from 0.1 to 1 mm. The samples with different pairs of electrodes (aluminum (Al) – chromium (Cr), indium (In) – chromium (Cr), aluminum (Al) – copper (Cu), silver (Ag) – aluminum (Al)) were used. The study of the light induced effect was performed using the slow modulation of the light falling on the crystal

In the nonsymmetrical MLM system is registered the stationary light induced current. The light response has a sharply defined spectral dependence with sign changing about 0.9 μm.

This effect includes the photovoltaic effect and the thermal induced contribution. In the thin-layer metal-ferroelectric-metal system the thermo-voltaic response exists which increases essentially with decreasing the crystal thickness. A sharp increase in the thermally induced current for small thicknesses of crystal (less than 100 mm) points to the crucial role of the near-contact zones with thicknesses of less than 100 mm.

In this paper the electrets model of the studied phenomenon caused by the field of contact potential difference at the metal-ferroelectric interface was proposed[4]. In the electrets model the thermoinduced changing of the conductivity of the crystal leads to change in the stationary current on the load impedance. All experimental dates are in accordance with the proposed model.

The results obtained can be used for investigating the properties of the sandwiched ferroelectric structures as well as for developing new types of the photo-thermo-electrical energy converters.

Список литературы

1. Serway, R. A., [Physics for Scientists & Engineers], (3rd ed.), Saunders, 1150-1164 (1990);
2. Kaminskii, V., "Dynamics of the thermovoltaic effect in SmS," Technical Physics Letters 39, 673-677 (2013);
3. Ivanov, V., Karpets, Yu., Marchenkov, N., Zdorovtsev, G., "Thermo-EMF models in $LiNbO_3$ crystals with different metal electrodes," Proc. SPIE 5851, 415-419 (2005);
4. Ivanov, V., Karpets, Yu., Perkov, Yu., "Photo-induced currents in the sandwich metal-ferroelectric-metal structure," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 168, 012034 (2017).

Исследование электрофизических свойств и электрокалорического отклика в твердом растворе магниобата свинца – цинкониобата свинца (PMZN)

Анохин А. С.[1], Еськов А. В.[1], Пахомов О. В.[1], Буй М. Т.[1], Семенов А. А.[2], Мыльников И. Л.[2]

[1]ИТМО
[2]СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: asanokhin@corp.ifmo.ru

Научно-техническое направление, связанное с разработкой и широким внедрением в практику компактных, экологически безопасных, экономичных и высоконадежных тепловых насосов и охладителей, работающих как в комнатных условиях, так и в области криогенных температур, чрезвычайно актуально в современном обществе. Среди разнообразных альтернативных технологий трансформаторов тепла большой интерес исследователей и разработчиков во всем мире привлекает возможность использования электрокалорического эффекта в твердотельных структурах [1, 2]. Главной технической трудностью, стоящей на пути создания малогабаритных высокоэффективных твердотельных охладителей на электрокалорическом (ЭК) эффекте, является необходимость использования тепловых ключей для осуществления процесса отвода тепла от охлаждаемого объекта. Ранее в работе [3] был предложен принцип построения и термодинамический цикл работы электрокалорического охладителя без использования тепловых ключей. Принцип работы таких охлаждающих устройств основан на эффекте разницы величин электрокалорического эффекта в сегнетоэлектрических материалах при поляризации и деполяризации сегнетоэлектрического образца при одинаковой температуре. Однако, поиск материалов, обладающих не только значительными величинами электрокалорического эффекта, но и большой величиной разницы электрокалорического эффекта при поляризации и деполяризации, остается актуальной задачей [4]. К тому же подобные материалы должны обладать технологичностью для изготовления на их основе многослойных емкостных структур.Одними из наиболее подходящих для применения в электрокалорических охлаждающих устройствах материалами являются сегнетоэлектрики, содержащие в качестве катиона ионы свинца. В работе проведено исследование

электрофизических свойств (температурная зависимость диэлектрической проницаемости, вольт-амперная характеристика, зависимость величины спонтанной поляризации от величины напряженности электрического поля и температуры) и экспериментальное исследование электрокалорического отклика в твердом растворе магниобата свинца – цинкониобата свинца.

Список литературы

1. Valant M. // Progress in Materials Science. 2012. V. 57(6). P. 980-1009;
2. Ozbolt M., Kitanovski A., Tusek J., Poredos A. // International journal of refrigeration.2014.V. 40. P. 174-188;
3. Karmanenko S., Semenov A., Dedyk A., Es'kov A., Ivanov A., Beliavskiy P., Pakhomov O. New approaches to electrocaloric-based multilayer cooling. In Electrocaloric Materials. // Berlin Heidelberg. Springer. 2014. P. 183-223;
4. Еськов А.В., Белявский П.Ю., Анохин А.С., Пахомов О.В., Семенов А.А., Мыльников И.Л., Никитин А.А., Буй М.Т., Черкасский М.А., Плотников В.В. Экспериментальное исследование электрокалорического отклика в сегнетоэлектрических материалах // Журнал технической физики — 2016. — Т. 86. — № 7. — С. 151-153.

Оптическое возбуждение спиновых волн в тонких пленках галфенола

Красильникова У. Д.[1,2], Хохлов Н. Е.[2], Шелухин Л. А.[2], Калашникова А. М.[2], Rushforth A. W.[3], Щербаков А. В.[2,4]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ
[3]University of Nottingham, UK
[4]Technical University Dortmund, Germany

Эл. почта: b-lack-u@yandex.ru

Сверхбыстрая лазерно-индуцированная магнитная динамика в наноструктурах является одним из наиболее актуальных направлений современных исследований [1, 2]. Повышенный интерес вызван, в первую очередь, практическими перспективами для сверхбыстрой записи и чтения информации, ее передачи между вычислительными устройствами [2]. Исследования оптического возбуждения прецессии намагниченности в различных материалах показали: лазерные импульсы могут стать альтернативой традиционным микроволновым методам генерации прецессии намагниченности и спиновых волн и даже превзойти их по ряду параметров [1]. Особый интерес имеют исследования спиновой динамики, возбуждаемой фемтосекундными лазерными импульсами, сфокусированными в пространственной области микронных масштабов [3-5]. В экспериментах использованы тонкие пленки с малым гильбертовым затуханием и малой магнитной анизотропией – допированные ферриты-гранаты [3], пермаллой [4], CoFeB [5].

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования оптического возбуждения спиновых волн при наличии легких осей анизотропии, лежащих в плоскости образца. В качестве образца использовалась пленка галфенола состава $Fe_{0.81}Ga_{0.19}$ толщиной 20 нм. Галфенол – новый материал спинтроники с долгоживущей спиновой прецессией, время жизни составляет до 2 нс и более [6, 7]. Эксперименты проводились по схеме «двуцветная накачка-зондирование». Импульсы накачки и зондирования, длительностью 100 фс с центральными длинами волн 515 и 1050 нм соответственно, фокусируются на образце в пятна диаметром порядка 1 мкм. Импульсы имеют управляемую временную задержку между собой, что обеспечивает возможность получения временных зависимостей прецессии намагниченности пленки. Размещение микрообъектива для фокусировки луча накачки на линейном пьезотрансляторе позволяет проводить пространственное сканирование магнитного возмущения образца. В результате в исследуемом образце наблюдалось распространение поверхностных прямых и объемных обратных спиновых волн на расстояния до 10 мкм при внешнем магнитном поле в плоскости пленки 100 мТл.

Наличие сильно выраженной анизотропии в плоскости образца приводит к нескольким особенностям, не наблюдаемых в ранее изученных материалах. Во-первых, спиновые волны возбуждаются под действием сверхбыстрого изменения анизотропии импульсом накачки, а не размагничивания или обратного магнитооптического эффекта. Во-вторых, фазовая и групповая скорости спиновых волн, форма волновых пакетов сильно зависят от взаимной ориентации магнитного поля и осей анизотропии. Эти особенности открывают новые возможности для управления спиновыми волнами в различных устройствах спинтроники.

Список литературы

1. A. M. Kalashnikova, A. V. Kimel, R. V. Pisarev, Phys. Usp. 58 969–980 (2015);
2. D. Bossini et al. ACS Photonics 3 (8) pp. 1385–1400 (2016);
3. A.I. Chernov et al. Optics letters, 42 (2) pp. 279-282 (2017);
4. Y. Au et al. Physical Review Letters, 110 (9) p. 097201 (2013);
5. S.-J. Yun, C.-G. Cho and S.-B. Choe, Appl. Phys. Express 8 063009 (2015);
6. J.V. Jäger et al. Applied Physics Letters 103 (3) p.32409 (2013);
7. V.N. Kats et al. Phys. Rev. B 93 (21) p. 214422 (2016).

Heat and mass transfer processes during combustion of solid fuel

Beketayeva M.[1], Askarova A.[1], Bolegenova S.[1], Maximov V.[1]

[1]Al-Farabi Kazakh national university, Kazakhstan

Эл. почта: beketayeva.m@gmail.com

The article is devoted to the complex research of heat and mass transfer processes occurring in the real conditions of solid fuel (coal) combustion in the boiler. As an object had chosen the Kazakh coal with 40% ash content. Industrial exploitation of them conducted with ecological and economic damages [1], therefore its' deeply research has increased scientific and applied relevance [2]. The complex processes of heat and mass transfer in the presence of combustion are non-stationary, strongly non-isothermal with a constant change in the physical and chemical state of the environment. It greatly complicates their experimental study. Thus numerical methods were have been used to describe the aerodynamic and heat-mass transfer process at high-temperature media. Applying of computational technology allow us to observe the actual physical and chemical processes that occur in the areas of real geometry of the combustion chamber during the burning of energy fuel as accurate as possible. It has been established mathematical model of physical-chemical processes of solid fuel combustion. Dynamics of high-speed flow, temperature and concentration fields found in the volume of the combustion torch. Obtained results have great practical importance; It will allow improve geometry of combustion chambers and burners, optimize the technological process of fossil fuel burning and design brand new energy constructions.

Список литературы

1. Askarova A.S., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., etc. Computational Method for Investigation of Solid Fuel Combustion in Combustion Chambers of a Heat Power Plant, High Temperature, Vol. 53, Iss. 5, P. 751–757, 2015;
2. Heierle E.I., Manatbayev R., Maximov V.Ju., etc. CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan, Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, P. 260-265, 2016.

Особенности формирования структуры сигнала ядерного магнитного резонанса в слабых магнитных полях

Мязин Н. С.[1], Давыдов В. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: myazin.n@list.ru

В настоящее время одной из задач прикладной физики является разработка различных методов для контроля в реальном времени состояния жидкой среды, как в текущем, так и в стационарном состоянии. Одно из наиболее перспективных решений этой задачи — использование приборов, принцип работы которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Такие приборы применяются для исследования структуры потока жидкой среды при различных её параметрах для совершенствования математических моделей, описывающих распределения скоростей в потоке [3]. В основном эти исследования проводятся на ламинарных потоках жидкой среды. Поэтому для этих исследований используются различные ЯМР томографы, с помощью которых регистрируется томограмма потока в определенном сечении трубопровода, измеряются константы релаксации T_1 и T_2 жидкости, по которым можно контролировать её состояние [3]. При изменениях скорости потока жидкости υ в большом диапазоне (более чем на два порядка) и переходе, например, режима течения жидкости из ламинарного в турбулентный, возникают большие сложности с регистрацией сигнала ЯМР, а также с измерением расхода жидкости q по причине процессов диффузии и т.д. Это обстоятельство в первую очередь сделало нецелесообразным использование ЯМР томографов для измерения расхода жидкой среды с одновременным контролем её состояния.

Для измерения расхода жидкой среды и её состояния по константам релаксации в системах охлаждения различных энергетических установок, при производстве щелочей и кислот, а также биологических растворов применяются ЯМР расходомеры–релаксометры [6]. Последняя разработка компании KROHNA – ЯМР расходомер-релаксометр для контроля расхода и состояния (по T_2) нефти и нефтепродуктов активно внедряется в производство. В этом приборе возможна регистрация сигнала ЯМР только с использованием модуляционной методики [6]. Другие методы регистрации сигнала ЯМР, как показали проведенные экспериментальные исследования, на быстрых потоках жидкости реализовать достаточно сложно.

Кроме того, модуляционная методика зарекомендовала себя как надежный способ регистрации сигнала в ЯМР магнитометрах с текущим образцом. На основе этих приборов много лет в СССР находился в эксплуатации первичный эталон магнитной индукции. В настоящее время в РФ находятся в эксплуатации два эталона магнитной индукции.

Для обеспечения наибольшего отношения сигнал/шум (S/N) регистрируемого сигнала ЯМР с использованием модуляционной методики от текущей среды при диапазоне изменения q более чем на два порядка схема автодинного детектора настраивается на сигнал поглощения (работают на срыве режима колебаний, остальные параметры: зна-

чение частоты f_m и H_m амплитуды поля модуляции, однородность магнитного поля подбираются под реализацию данного режима регистрации). Этот вопрос достаточно хорошо изучен.

В случае использования нами модуляционной методики регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле малогабаритного ЯМР спектрометра при решении с его помощью задач по экспресс-контролю состояния жидких сред [7] схема автодинного детектора настроена на другой режим работы в отличие от ЯМР спектрометра на текущем образце. Уровень генерации поля H_1 в катушке регистрации выставляется таким образом, чтобы отношение S/N было максимально. Параметры поля модуляции f_m и H_m подбираются так, чтобы выполнялись установленные нами в результате исследований соотношения, позволяющие регистрировать сигнал ЯМР в слабом поле ($B_0 < 0.1$ Т). В этом случае структура линии регистрируемого сигнала, которая используется для измерения T_1 и T_2, представляет собой сумму сигналов поглощения и дисперсии, что является особенностью данной регистрации. Проведенные исследования показали наличие неоднозначного влияния этой особенности регистрации сигнала ЯМР в слабом поле, которая ранее не рассматривалась, на величину отношения S/N. Учет её при экспресс-контроле различных сред малогабаритным ЯМР спектрометром является одним из направлений расширения его функциональных возможностей.

Список литературы

1. Osan T.M., Olle J.M., Carpinella M., Cerioni L.M.C., Pusiol D.J., Appel M., Freeman J., Espejo I., Fast measurements of average flow velocity by low-field 1H NMR, Journal of Magnetic Resonance, 209,116–122, 2011;
2. Zhernovoi A.I., Latyshev G.D., Nuclear magnetic resonance in a flowing liquid, Consultants Bureau, New York, 1965;
3. Мязин Н.С, Рукин Е.В,, Давыдов В.В., Мазинг М.С., О возможности регистрации спектров поглощения в слабых магнитных полях методом ядерного магнитного резонанса, Тезисы докладов международной молодёжной конференции ФизикА.СПб, 24–24 октября 2017, 178–179, 2017.

Метод функционального интегрирования в теории двухкомпонентных растворов

Шнайдер А. А.[1], Захаров А. Ю.[1], Евстигнеева Н. В.[1]

[1]НовГУ

Эл. почта: saa10x04@mail.ru

В настоящее время теоретической основой исследования термодинамических свойств растворов является статистическая термодинамика. В ее рамках эта задача сводится к вычислению статистических сумм систем. Однако, точное вычисление статистических сумм к настоящему времени удалось выполнить для крайне ограниченного набо-

ра «точно решаемых модельных гамильтонианов», практически все из которых далеки от реальности. А у существующих приближенных методов нет априорных оценок погрешности используемых приближений.

В связи с этим большая часть теоретических исследований растворов основывается на феноменологических моделях [1-3], в которых задается определенный вид зависимости термодинамических функций от температуры, объема (или давления) и состава системы. Межатомные взаимодействия учитывается введением параметров. Условно феноменологические модели можно разделить на решеточные и континуальные.

Решеточные модели жидких и твердых растворов позволяют в некоторой степени учесть ближний порядок в конденсированных системах и с этой точки зрения они более предпочтительны, чем континуальные модели [4-5]. Однако формы конфигурационного и энтропийного вкладов в свободную энергию при этом выбираются независимо друг от друга, что вызывает определенные сомнения в их согласованности [6].

В работах [7-9] был предложен, а в последующих работах [10-11] был существенно развит метод функционального интегрирования для вычисления конфигурационного интеграла однокомпонентных систем с центральным межатомным потенциалом, допускающим преобразование Фурье. Были выведены уравнения состояния однокомпонентных систем с модельными потенциалами, исследованы двухфазные равновесия. При этом получено хорошее согласие с экспериментом.

Данная работасодержит обобщение метода функционального интегрирования на случай двухкомпонентных систем с парными межатомными потенциалами общего вида и построения микроскопической теории бинарных твердых и жидких растворов. Получено представление для классической статистической суммы бинарного континуального раствора для произвольного межатомного потенциала через функциональный интеграл, который был вычислен в эргодическом и гауссовом приближениях. Это позволило определить термодинамические функции бинарного раствора: свободную энергию, энтропию. Вид этих термодинамических функций определяется видом межатомных потенциалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерству образования и науки РФ в рамках проектной части Госзадания (грант №. 3.3572.2017).

Список литературы

1. E.A. Guggenheim. Mixtures. Oxford: Clarendon Press, 1952. 270 pp.;
2. T.Boublik, I.Nezbeda, K.Hlavaty. Statistical Thermodynamics of Simple Liquids and Their Mixtures. Amsterdam: Elsevier, 1980. 145p.;
3. J.V.Sengers, R.F.Kayser, C.J.Peters, H.J.White (Eds.). Equations of State for Fluids and Fluid Mixtures. Amsterdam: Elsevier, 2000. 885 pp.;
4. I.R.Prigogine. The Molecular Theory of Solutions. Amsterdam: North-Holland, 1957. 448 pp.;
5. Н.А. Смирнова. Молекулярные теории растворов. Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1987;
6. A.Yu.Zakharov, O.V.Lognova. J. Molec.Liquids,120 (1-3), 31–34 (2005);
7. Д.Н. Зубарев. ДокладыАНСССР, 95(4), 757–760 (1954);
8. A.Yu.Zakharov. Phys. Lett. A,147(8/9), 442--444 (1990);

9. A. Yu. Zakharov, I.K. Loktionov.Theor. andMath.Phys. 119(1),532–539 (1999);
10. И.К. Локтионов. Теплофизика высоких температур, 38(3), 516–519 (2000); И.К. Локтионов.Теплофизика высоких температур. 39(2), 344–347(2001); И.К. Локтионов. Теплофизика высоких температур, 49(4), 529–536(2011); И.К. Локтионов. Теплофизика высоких температур, 50(3), 384–391 (2012); И.К. Локтионов. Теплофизика высоких температур. 50(6), 760–768 (2012);
11. И. К. Локтионов. Журн. техн. физ., 85(3), 402–414 (2014).

Исследование температурных зависимостей упруго-пластических свойств кристаллов GaN

Гузилова Л. И.[1], Кардашев Б. К.[1], Николаев В. И.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: guzilova@mail.ioffe.ru

При конструировании оптоэлектронных приборов и устройств наряду с оптическими и электрическими характеристиками используемых полупроводниковых материалов, крайне важными являются и их механические свойства. На данный момент недостаточно полно исследованы упругие и пластические свойства кристаллов и тонких слоёв нитрида галлия (GaN), который широко используется в полупроводниковой технике. Также не изучено влияние температуры на эти свойства GaN, а это важно для оптимизации процесса роста монокристаллов и тонких слоёв GaN.

Одним из универсальных методов изучения упруго-пластических свойств материалов – является метод наноиндентирования [1]. В [2] продемонстрировано применение данного метода для исследования поверхностей (0001) и (10-10) монокристаллов GaN, которые были получены методом газовой хлорид-гидридной эпитаксии, исследуемые кристаллы имели размер 5×5×0.4 мм^3. Были получены следующие значения модуля Юнга: 323.8 и 284.2 ГПа для плоскостей (0001) и (10-10), соответственно. Данные значения, на наш взгляд, являются немного завышенными, надо заметить, что при экспериментах по индентированию многое зависит от формы и размера пирамидки. Оптимальными для обеспечения высокой точности исследований упругих и пластических свойств материалов, в частности GaN, являются акустические измерения. Однако, для осуществления подобных измерений требуются достаточно большие кристаллы, длиной до 30 мм. Монокристаллические образцы таких размеров получить сложно, а для ряда ориентаций пока практически невозможно. Поэтому в нашей работе использовались анизотропные поликристаллические образцы GaN, которые были получены с помощью хлорид-гидридного осаждения в реакторе горизонтального типа, полученные в том же процессе, что и монокристаллические слои, с той лишь разницей, что осаждение производилось на керамическую подложку, а не на монокристаллическую подложку [3]. Использовались два типа образцов, вырезанные вдоль газового потока в реакторе и поперек него, которые приклеивались к кварцевлму стержню. Система кварц-образец образовывала со-

ставной пьезоэлектрический вибратор [4]. Кварцем на частоте 100 кГц возбуждалась продольная стоячая ультразвуковая волна, составной вибратор, настраивалась в резонанс. Зная резонансную частоту составного вибратора и резонансную частоту пьезокварца, вычисляли резонансную частоту образца при различных температурах и определяли модуль Юнга E и декремент затухания δ в диапазоне 110-430K.

В результате проведенных исследований было обнаружено, что в направлении кристалла, соответствующем направлению газового потока, наблюдается небольшое снижение модуля Юнга (E), и в направлении соответствующему, направлению поперек газового потока, напротив, при достижении 280 K начинается значительное снижение модуля Юнга (E). Также, снижение модуля Юнга при повышении температуры является обратимым при дальнейшем охлаждении до исходной точки.

Список литературы

1. Fischer-Cripps A.C., Nanoindentation (Springer, Heidelberg, 2011);
2. Fujikane M., Inoue A., Yokogawa T., Nagao S., Nowak R., Mechanical properties characterization of c-plane (0001) and m-plane (10−10) GaN by nanoindentation examination, Phys. Status Solidi C, Vol.7, No. 7-8, P. 1798-1800, 2010;
3. Мынбаева М.Г, Печников А.И., Ситникова А.А., Кириленко Д.А., Лаврентьев А.А., Иванова Е.В., Николаев В.И., Пластины кристаллического GaN большой площади, Письма в ЖТФ, Т. 41, No.5, С. 84-92, 2015;
4. Кардашев Б.К., Внутреннее трение и физико-механические свойства твердых тел, Кристаллография, Т. 54, No. 6, С. 1074-1086, 2009.

Исследование влияния гидродинамических и конструкционных параметров микрофлюидного устройства с биочипом на аналитический сигнал

Есикова Н. А.[1], Буляница А. Л.[1], Тараскин А. С.[2], Евстрапов А. А.[1]

[1]ИАП РАН
[2]НИИ гриппа

Эл. почта: elpis-san@yandex.ru

Иммунный анализ находит широкое применение в медицине, в том числе для обнаружения антигенов, включая вирус гриппа. Одним из направлений исследований является поиск новых способов проведения анализа, позволяющих сократить его длительность и повысить чувствительность. В работе показано, что использование микрофлюидного устройства в сочетании с биочипом позволяет существенно сократить длительность анализа. Приведены данные по исследованию влияния скорости потока пробы над чувствительной площадкой биочипа на аналитический сигнал при флуоресцентной регистрации результатов реакции связывания биотин-стрептавидин, получившей широкое распространение в иммунном анализе.

Для экспериментальных исследований методом «мягкой» литографии была создана проточная камера из полидиметилсилоксана (ПДМС), прочно фиксируемая относительно биочипа на время проведения реакции. Такой подход позволяет объединить преимущества биочипов и проточной системы, а также использовать стандартный ридер для детектирования биочипов.

Биочипы с пришитым к поверхности биотинилированным антителом 4H1b (ФГБУ «НИИ гриппа» Минздрава России) с матрицей чувствительных элементов 20×3 диаметром 400 мкм каждый с помощью механического приспособления соединялся с проточной камерой из ПДМС объемом 7 мкл. Через камеру с помощью перистальтического насоса циклически прокачивалась проба (25 мкл флуоресцентно меченого стрептавидина Str-Cy5) при различной скорости потока и с разной продолжительностью. Результаты реакции 4H1b со Str-Cy5 регистрировались ридером после отмывки матрицы натриевофосфатным буферным раствором pH=7.5 с добавлением 0,01% Tween 20 (расход 22 мкл/мин, отмывка в течение 10 минут).

Результаты экспериментальных исследований были использованы при разработке физико-математических моделей процессов, происходящих в микрофлюидном устройстве. Оценено влияние определяющих параметров (размеров камеры, скорости прокачивания пробы, длительности проведения реакции, концентрации Str-Cy5) на аналитический сигнал. Определено значение критической скорости прокачивания пробы, при превышении которой начинается снижение величины аналитического сигнала. Это, вероятно, обусловлено отрывом части пришитых на подложку антител и недостатком времени пребывания антигена вблизи антител для иммунного связывания.

Показано, что зависимость аналитического сигнала от концентрации белка для печати на подложке 4H1b в диапазоне 125-500 мкг/мл имеет степенной вид, при этом для разных режимов показатель степени меняется от 0,39±0,06 до 0,59±0,02. Для Str-Cy5 в диапазоне концентраций от единиц до 1000 нг/мл при длительности проведения реакции 10 мин, расходе пробы 22 мкл/мин, зависимость аналитического сигнала может быть аппроксимирована как $I=1936{,}3\sqrt{C}$; [C] нг/мл (коэффициент корреляции 0,87÷0,98).

Кроме того, продемонстрирована возможность обнаружения предложенным способом вируса гриппа A/California/07/09 (H1N1)pdm09 концентрацией 60÷500 нг/мл при проведении трехстадийной реакции («сэндвич»).

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН №36 на 2018 г., проект «Микрофлюидные устройства для извлечения и концентрирования нуклеиновых кислот и белков из биологической пробы».

.

Thermodynamic analysis of chemical processes in Ni/Cr/Si structure for growing carbon nanotubes by CVD

Il'in O. I. [1], Rudyk N N[1], Il'ina M V[1], Klimin V S[1], Fedotov A A[1]

[1]Southern Federal University, Russia

Эл. почта: oleg.ilin.sfedu@gmail.com

Carbon nanotubes (CNTs) are already finding application in various fields of electronic engineering [1], and are a promising material for the creation of a new element base of nanoelectronics [2]. The method of chemical vapor deposition (CVD) remains the most promising method [3], due to the possibility of local and controlled growth of CNTs on a pre-formed catalytic centers (CC). At the same time to create the device structures it is an important condition for the formation of the contact to the base of the CNT. In [4] it is shown that different combinations of materials catalyst/underlayer/substrate results in significantly different parameters of CNTs grown on them. Ni as catalyst and Cr as an underlayer provides a CNT with a better "growth quality". Therefore, carrying out the thermodynamic analysis of the interaction of the materials used as a catalyst (Ni), the underlayer (Cr) and the substrate (Si) at various stages of CC formation and CNT growth, with considering the composition of the process media at all stages of CVD process is an important task.

Establishing laws of thermodynamic processes in the interfacial interaction of materials in structure Ni (10 nm)/Cr (20 nm)/Si (380 μm) was performed using a commercially available program package FactSage 6.2 (GTT Technologies, Germany). Determination of the temperature dependence of the change of the Gibbs free energy $\Delta G(T)$ and drawing of phase diagrams was carried out with considering the non-linear thermo-physical properties of materials and real technological modes of CNTs growing.

As a result of chemical analysis of the thermodynamic processes taking place in the structure of Ni/Cr/Si found that during mounting the sample in the CVD chamber and subsequent heating material of Ni/Cr/Si structure is oxidized. Thus Cr underlayer oxidation occurs due to the exchange reaction of Cr with NiO, with the formation of chromium oxide. On heating stage occurs chamber cleaning process of unwanted residual water vapor and oxygen, as well as the formation of chromium silicide layer. The presence of an oxidated catalyst (NiO) requires an additional stage of recovery. On activation stage take place reactions of Ni recovery resulting in full catalyst reduction that can be used for the subsequent growth of nanotubes. It is shown that reduction of the underlayer of chromium oxide with given parameters of the process is not possible. Thus, under the Ni catalytic layer formed underlayer with complex composition $Cr/Cr_xO_y/CrSi_2$, which act as a diffusion barrier to the interaction of the Ni and the Si substrate. It is found that on growth stage occurs decomposition of acetylene on Ni catalyst centers, with release of free carbon. In this case, the underlayer may form a solid solution of a mixture $Cr_2O_3 + Cr_3C_2$.

The obtained results allow to optimize the process of growing CNTs by the CVD method to produce less defective nanotubes, as well as to optimize the methodology for the selection of

the underlayer material to form a conductive contact to the CNT, which is necessary for the creation of micro- and nanoelectronic devices.

This work was funded by the Russian Foundation of Basic Research (project №16-29-14023 ofi_m and №18-32-00652 mol_a) and Internal gran of Southern Federal University (№VnGr-07/2017-26).

Список литературы

1. Michael De Volder F.L., Tawfick S.H., Baughman R.H., Hart A.J., Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications, Science, 339, 535-539, 2013;
2. Il'ina M.V., Il'in O.I., Blinov Yu.F., Smirnov V.A., Kolomiytsev A.S., Fedotov A.A., Konoplev B.G., Ageev O.A., Memristive switching mechanism of vertically aligned carbon nanotubes, Carbon, 123, 514-524, 2017;
3. Ageev O.A. et.al. Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices, Springer Proceedings in Physics, 175, 563-580, 2016;
4. Cassell A.M., Qi Ye, Cruden B., et. al., Combinatorial chips for optimizing the growth and integration of carbon nanofibre based devices, Nanotechnology, 15, 9—15, 2004.

Оптимизация энергетической зависимости чувствительности счётчиков Гейгера-Мюллера для области энергий гамма-излучения от 0,05 до 3 МэВ

Ивашева А. Ю.[1,2], Семенихин П. В.[2,3]

[1]СПбПУ
[2]ЦНИИ РТК
[3]ФТИ

Эл. почта: nastena9688@mail.ru

Счётчики Гейгера-Мюллера являются наиболее распространенным вариантом детектирующего элемента, используемого в большинстве бытовых дозиметров [1, 2], так и специализированных приборов двойного назначения [3]. Они компактны и позволяют использовать относительно простую схемотехнику для обработки регистрируемого сигнала.

Вычисление мощность дозы гамма-излучения производится по скорости счета, получаемой на счетчике, с учетом его чувствительности и мёртвого времени:

$$P = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{n}{1 - n \cdot \tau}$$

где, P – искомая мощность поглощённой дозы в мГр/ч, η — чувствительность счетчика в (имп/с)/(мГр/ч), n– скорость счета счетчика в имп/с, τ – мертвое время в с.

Но значение параметра чувствительности сильно зависит от энергии излучения. Обычно, производителем счетчика приводится значение коэффициента чувствительно-

сти откалиброванного по источнику Cs-137. Так как, спектр его излучения имеет чётко выраженный пик излучения с энергией ~ 661 кэВ и данный радионуклид является одним из наиболее распространенных источников радиоактивного загрязнения [4]. Но при попытке измерения мощности дозы гамма-излучения со спектром, отличным от спектра Cs-137, например, спектр рентгеновского излучения или ряда других радионуклидов, возникающих при радиационных авариях или при наличии источников бета-излучения, будет возникать погрешность измерения, составляющая несколько порядков.

Для корректировки энергетической зависимости чувствительности счетчиков Гейгера-Мюллера от энергии можно применять фильтры [5, 6], представляющие собой металлические пластины или фольги, для частичного поглощения низкоэнергетического излучения.

Представленное в работе исследование посвящено поиску оптимального корректирующего фильтра, для выравнивания энергетической зависимости чувствительности счётчика в области энергии от 0,05 до 3 МэВ. В ходе работы были построены и откалиброваны, в широком диапазоне энергий, математические модели наиболее распространенных счетчиков, и подобранны для них соответствующие конструкции корректирующих фильтров.

Список литературы

1. Ghuge N.N., Sapna Jasrotia, Anamika, Chilsea Sadhu, Geiger-Muller: A thin end window tube radiation detector, International Journal of Research in Engineering and Technology, 4 (5), pp. 190-196, 2015;
2. K. Stankovic, P. Osmokrovic, The model for calculating the type A measurement uncertainty of GM counters from the aspect of device miniaturization, IEEE Transactions on Nuclear Science, 61 (3), pp. 1316-1326, 2014;
3. О. Е. Лапин, А. Н. Власенко, В. П. Демченков, А. Ф. Первишко Малогабаритное устройство для визуализации источников гамма-излучения // Патент России № 2426151. 2011. Бюл. № 22;
4. И. Я. Василенко, Радиоактивный Цезий-137, Природа, 3, стр 70-76, 1999;
5. Ю.В. Сивинцев, Насколько опасно облучение, Москва, Знание, 1988;
6. H. Zhu; S. Kane; S. Croft; R. Venkataraman; F. Bronson " Optimization of the Canberra UltraRadiac GM Tube Wrapping " Nuclear Science Symposium Conference Record, 2006. IEEE.

Генерация реактивных напряжений в монокристаллах NiFeGaCo с эффектом памяти формы

Аверкин А. И.[1], Тимашов Р. Б.[1], Солдатов А. В.[1], Крымов В. М.[1], Николаев В. И.[1]

1ФТИ

Эл. почта: AndreyAverkin@mail.ru

Способность сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) совершать полезную работу при фазовых превращениях позволяет использовать их в приводах и силовых двигателях. В работе такого привода материал с ЭПФ испытывает противодействие, в нем возникают реактивные напряжения, которые возрастают с ростом температуры и направлены на преодоление противодействующей силы.

В настоящее время рекордная величина реактивных напряжений, 800 МПа, наблюдалась в поликристаллических образцах сплава Ni_2TiCu. Несмотря на столь высокое значение реактивных напряжений использование поликристаллических материалов в реальном устройстве часто нежелательно из-за того, что деформация в поликристаллах не полностью обратима, наблюдается кроме фазовой деформации и пластическая, что затрудняет управление работой такого привода.

Альтернативой поликристаллам Ni_2TiCu могут служить монокристаллы сплава NiFeGaCo. Деформация памяти формы в них достигает 12% и является полностью обратимой. Они обладают высоким пределом прочности при этом напряжения необходимые для деформации этого материала могут составлять единицы МПа.

Данная работа посвящена исследованию процесса генерации механических напряжений в монокристаллах сплава с ЭПФ при их нагреве, исследовались образцы, вырезанные из монокристалла $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ ориентированного в направлении [100]А. Для обеспечения стабильных высоких показателей перед испытанием образцы подвергались отжигу в течении 2 часов при 1323 К с последующей закалкой в воду.

Образцы деформировались путем одноосного сжатия, так чтобы достичь максимально возможной деформации памяти формы, которая для данного кристаллографического направления составляла ~5,5%. Деформированные кристаллы помещались между неподвижными колоннами испытательной машины, защемлялись (слегка подгружались) и подвергались нагреву. Так как было затруднено восстановление деформации памяти формы, в образце развивались растягивающие напряжения, которые измерялись по действию образца на датчик испытательной машины и записывались как функция температуры.

Результаты исследования защемленных образцов демонстрируют, что температурный интервал генерации напряжений составляет 340÷690 К. При этом отклонение от линейного роста напряжений проявляется только при температуре 550 К. До этой температуры все изменения деформации образца полностью обратимы. При температуре 690 К достигается максимум реактивных напряжений 600 МРа. Затем следует этап быстрого снижения реактивных напряжений, вплоть до нуля при 810 К. Это снижение

вызвано диффузионным распадом метастабильной мартенситной фазы и как следствие деградацией функциональных свойств материала.

Полученные данные, позволяют рассматривать кристаллы сплавов NiFeGaCo как весьма перспективные для применения их в приводах и силовых двигателях на ЭПФ и могут служить основой для теоретического расчёта работы таких двигателей.

Работа поддержана Российским научным фондом (Грант РНФ № 16-19-00129).

Список литературы

1. Аверкин А.И., Крымов В.М., Гузилова Л.И., Тимашов Р.Б., Солдатов А.В., Николаев В.И., Реактивные напряжения в монокристаллах сплава $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ с эффектом памяти формы, Письма ЖТФ 2018. Т. 44. В. 5. СС. 3-9, 2018.

Численное моделирование кремниевых обострительных диодов с «плавными» и «резкими» p-n-переходами

Иванов М. С.[1,2], Родин П. Б.[2], Подольская Н. И.[2]

[1]СПбПУ
[2]ФТИ

Эл. почта: lygeon@gmail.com

Время переключения из блокирующего в проводящее состояние, напряжение переключения U_m и остаточное напряжение U_{res} являются важнейшими характеристиками ключевых полупроводниковых приборов замыкающего типа, причем отношение U_{res}/U_m характеризует эффективность ключа. Недавно было экспериментально установлено [1, 2], что остаточное напряжение импульсных высоковольтных лавинных ключей пикосекундного диапазона – кремниевых обострительных диодов – критически зависит от профиля легирования. Независимо от типа исходного кремния и технологии изготовления p^+-n-n^+ структуры имеют низкое отношение $U_{res}/U_m \approx 0.2$, в то время как p^+-p-n-n^+ структуры характеризуется аномально большими остаточными напряжениям U_{res} ($U_{res}/U_m \approx 0.5$), близкими к напряжению стационарного лавинного пробоя U_a. При этом время переключения (менее 100 пс) и напряжения переключения (~2 кВ) для этих двух групп структур практически одинаковы при одинаковых значениях $U_a \approx 1$ кВ. Это неожиданное и важное на практике свойство обострительных диодов до сих пор не получило физического объяснения. В силу разной технологии изготовления p^+-n-n^+ и p^+-p-n-n^+ структуры имеют также разные типы и концентрации глубоких центров [2]. Поэтому неясно, связано ли аномальное большое остаточное напряжение с профилем легирования или с глубокими центрами.

В настоящей работе проведено численное моделирование сверхбыстрого лавинного переключения диодных структур p^+-n-n^+ и p^+-p-n-n^+ типа. Показано, что независимо от типа структуры интенсивная ударная ионизация начинается в n-базе вблизи p-n-перехода. Затем сверхбыстрый фронт ударной ионизации, движущийся в направлении

дрейфа электронов, заполняет базу электронно-дырочной плазмой с концентрацией более 10^{15} $см^{-3}$. Однако, в противоречии с широко распространенной картиной сверхбыстрого переключения [3], в условиях экспериментов [1, 2] распространение фронта ионизации в противоположном направлении, к p-n-переходу и далее в p-базу, не происходит. В результате проводимость достаточно толстого (50 мкм при толщине n-базы 100 мкм) p-слоя p^+-p-n-n^+ структуры остается непромодулированной. Пространственный заряд неравновесных носителей и примеси формирует в p-слое домен сильного электрического поля, обусловливающий высокое остаточное напряжение. Таким образом, результаты моделирования указывает на профиль легирования структуры как на возможную причину аномально большого остаточного напряжения.

Моделирование проведено с помощью программного обеспечения Silvaco. Работа выполнена при поддержке РНФ, грант 14-29-00094.

Список литературы

1. Брылевский В.И., Смирнова И.А., Родин П.Б., Грехов И.В., Субнаносекундное лавинное переключение высоковольтных кремниевых диодов с резкими и плавными p-n-переходами, Письма в ЖТФ 40(8), 80-87, 2014;
2. V. Brylevskiy, I. Smirnova, A. Gutkin, P. Brunkov, P. Rodin, I. Grekhov, Delayed avalanche breakdown of high-voltage silicon diodes: Various structures exhibit different picosecond-range switching behavior, Journal of Applied Physics 122, 185701, 2017;
3. Grekhov I.V., Novel Closing Switches Based on Propagation of Fast Ionization Fronts in Semiconductors, IEEE Trans. Plasma Science, 36(2). 378-382, 2008.

Влияние степени переохлаждения неупорядоченной системы на морфологию кристаллических структур

Яруллин Д. Т.[1]

[1]КФУ

Эл. почта: dinar96@list.ru

В настоящее время задача, связанная с исследованием фазовых переходов в условиях глубокого переохлаждения, является одной из актуальных. Так, до сих пор нет ясного понимания влияния переохлаждения на морфологию кристаллических структур, формирующихся в аморфных (стекольных) системах. Данный вопрос не может быть решен экспериментальными методами, так как размер образующихся зародышей слишком мал для детектирования. Данные трудности могут быть преодолены при использовании методов компьютерного моделирования, что делает их незаменимым инструментом при изучении структурно-фазовых трансформаций.

В настоящей работе исследуется процесс кристаллизации аморфной металлической системы, состоящей из 14700 идентичных частиц. Межчастичное взаимодействие зада-

ется потенциалом Джугутова [1]. Посредством кластерного и структурного анализа оцениваются морфологические характеристики формирующихся кристаллических структур при различных значениях переохлаждения системы. Для определения очагов кристаллизации используется метод, основанный на вычислении параметров локального ориентационного порядка [2]. Было обнаружено, что по мере увеличения степени переохлаждения системы увеличивается несферичность формы зародышей. Показано, что с ростом переохлаждения увеличивается количество зародышей в системе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта No. 18-32-00021.

Список литературы

1. Dzugutov M., Larsson K.-E, Pair potential in liquid lead, Phys. Rev. A, 38, 7, 1988;
2. ten Wolde P.R., Ruiz-Montero M. J., Frenkel D, Numerical Evidence for bcc Ordering at the Surface of a Critical fcc Nucleus, Phys. Rev. Lett. 75, 2714, 1995.

Новая конструкция волоконно-оптической линия связи для передачи СВЧ сигналов в X – диапазоне

Фадеенко В. Б.[1], Давыдов В. В.[1]

[1]СПБПУ

Эл. почта: v21.07.96@mail.ru

В современном мире одной из наиболее актуальных проблем при эксплуатации радиолокационных станции (РЛС) в условиях высокого уровня электромагнитных помех, которые необходимо решить, является передача СВЧ сигналов между различными устройствами, входящими в состав станции [1, 2]. В зависимости от конструкции РЛС и специфики объекта, на котором она размещается, соединительные кабели, по которым передаются сигналы, проходят через различные зоны, насыщенные как помехами, так и резкими поворотами, особенно в случае размещения РЛС на морском объекте [3-5]. В зависимости от решаемых задач и условий эксплуатации для передачи сигналов различной частоты используются коаксиальные кабели, волноводы и волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). В последнее время, как для проведения исследовательской деятельности, так для реализации стратегических задач, укомплектовываются большим количеством радиоэлектронной аппаратуры, приемно-передающие модули которой должны быть достаточно компактно размещены на верхних палубах мачтовых стоек морского судна. Кроме того, данные палубы должны обладать возможностью осуществлять повороты и сканирующие движения под различными углами с определенной скоростью. Это потребовало пересмотреть систему передачи сигналов от приемно-передающих устройств в корпус корабля, где расположены устройства обработки сигнала и управления РЛС.

Одним из наиболее перспективных направлений решения этой задачи является использование для передачи сигналов ВОЛС, которые обладают неоспоримыми преимуществами в отличие от коаксиальных кабелей и волноводов. Такими преимуществами являются широкая полоса пропускания (для одномодового волокна составляет до 50 ГГц); независимость величины потерь оптического волокна от частоты передаваемых СВЧ-сигналов и т.д. [3-5].

В настоящее время при разработке новых и модернизации действующих РЛС особое внимание уделяется повышению надежности её работы при увеличении скорости передачи информации между различными устройствами, входящими в состав станции. Необходимо отметить, что под определенную конструкцию РЛС необходимо разрабатывать ВОЛС, в структуре которой должны быть учтены как особенности эксплуатации самой РЛС, так и частотный диапазон, в котором она работает. В представленной работе рассматривается разработка новой конструкции ВОЛС для передачи СВЧ сигналов в Х-диапазоне для РЛС морского базирования с разделенными антеннами для излучения и приема.

Особенностью эксплуатации данных РЛС является то, что для излучения СВЧ сигнала используется параболическая антенна непрерывного действия высокой мощности с широкой диаграммой направленности. Отраженные сигналы от различных объектов принимаются приемной антенной в непериодической последовательности. Причем, в приемное устройство кроме отраженного основного сигнала от объекта поступают также различные зеркальные сигналы, которые образовались в результате отражений, так иногда одновременно облучаются диаграммой направленности несколько объектов. Кроме того, расстояние, на которое передается СВЧ сигнал, не превышает 100 м в отличие от других типов РЛС морского базирования.

Поэтому в разработанной конструкции было принято решение использовать передающий лазерный модуль с прямой модуляцией лазерного излучения, а также из приемного тракта исключен малошумящий усилитель, который, как показали проведенные исследования, вносит дополнительные искажения в передаваемый после него оптический сигнал лазерным модулем, что значительно затрудняет его обработку для исключения зеркальных сигналов и дополнительных ошибок при определении расстояний до реальных объектов.

Одним из важнейших параметров, разработанной нами конструкции ВОЛС, является её амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Проведенные исследования показали, что неравномерность АЧХ составляет порядка 10 дБ во всем Х – диапазоне. Это позволяет передавать по ней принимаемые отраженные сигналы от различных объектов с высокой степенью надежности. Так как в предлагаемой нами конструкции ВОЛС из её состава исключен малошумящий усилитель, то необходимо исследовать характер изменения тангенциальной чувствительности приемного устройства антенны от частоты СВЧ сигнала. Полученные результаты исследований показали, что чувствительность приемного устройства при подключении разработанной ВОЛС существенно не изменилась. Кроме того, нами было установлено, что в разработанной новой конструкции ВОЛС влияние фазового набега, который связан с растяжением и сжатием оптического волокна

под воздействием температуры, на частотные и амплитудные характеристики передаваемого оптического сигнала несущественны.

Все это показывает, что разработанная новая конструкция ВОЛС для РЛС морского базирования работоспособна и может надежно передавать СВЧ сигналы, а предложенные при её изготовлении конструкторские решения на основе проведенных исследований, обоснованы.

Список литературы

1. Friman R.L. Fiber–Optic Systems for Communications. Wiley-interscience a John Wiley & Sons. Inc. 496 p., 2012;
2. Reinhold N. Essentials of Modern Optical Fiber Communication (Springer). 346 p., 2016;
3. Белкин М.Е., Сигов А.С. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника, Радиотехника и электроника, Т. 54(8). с. 901–914, 2009;
4. Saveleiv I.K., Sharova N.V., Tarasenko M.Yu., Yalunina T.R., Davydov V.V., Rud' V.Yu. Fiber-optic transmission system information for the testing of active phased antenna arrays in an anechoic chamber, Journal of Physics: Conference Series, vol. 917(5). p. 052020, 2017;
5. Tarasenko M.Yu., Davydov V.V., Sharova N.V., Lenets V.A., Yalunina T.R. Feature of use direct and external modulation in fiber optical simulators of a false target for testing radar station, Lecture Notes in Computer Science, 10531 LNCS. p. 227-232, 2017.

Компьютерное моделирование фемтосекундной лазерной абляции металлов

Давыдов Р. В.[1], Антонов В. И.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: davydovroman@outlook.com

В настоящее время большое распространение получило использование фемтосекундных лазеров для решения широкого круга прикладных задач в различных областях техники, медицины и биологии [1]. Так, например, в биологии с помощью фемтосекундных лазеров возможно создание отверстий микронного или даже субмикронного размера в живой клетке, для введения различных веществ, причем после этого клетка продолжает нормально функционировать [2]. Использование же лазерного излучения с подобной длительностью импульса при воздействии на металлы или полупроводники приводит к тому, что тепло не распространяется далеко за пределы области взаимодействия, а абляция материала (удаление его с поверхности) происходит не в виде капель расплавленного вещества (как в случае наносекундной длительности), а в виде плазмы или пара. Это приводит к увеличению точности обработки материала и получения более резких границ вплоть до субмикронного уровня [3].

При моделировании абляции металлов фемтосекундными лазерными импульсами на сегодняшнее время используются два основных подхода – молекулярно-динамические модели и термодинамические модели. Первый подход основан на решении (путем численного интегрирования) уравнений движения для систем атомов или молекул с учетом выбранного потенциала взаимодействия. Однако сам выбор потенциала взаимодействия (парного или же многочастичного), определяющего динамические свойства системы, представляет собой непростую задачу, а компьютерное моделирование требует значительных временных и вычислительных ресурсов, что ограничивает размеры исследуемой области [4]. Во втором подходе используют различные двухтемпературные термодинамические модели, зачастую дополненные гидродинамическими уравнениями. При расчете термодинамических параметров металла в широком диапазоне температур и давлений в ходе воздействия лазерного импульса на него в различных средах здесь важную роль играют уравнения состояния веществ, необходимые для решения гидродинамических уравнений [5]. Кроме того, существует некоторые варианты совмещения обоих подходов [6].

Поэтому для проведения компьютерного моделирования и увеличения точности расчетов по абляции лазерными импульсами фемтосекундной длительности в нашей работе предложена двухтемпературная модель с широкодиапазонной моделью теплопроводности и разработанным полуэмпирическим широкодиапазонным уравнением состояния для металлов [7]. Сам процесс абляции (учитывая поглощение лазерного излучения веществом, электронную теплопроводность и электронно-ионную релаксацию) будет описываться системой уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\frac{1}{\rho})+\frac{\partial v}{\partial m}=0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial m}=0$$

$$\frac{\partial E_e}{\partial t}+P_e\frac{\partial v}{\partial m}=\frac{\partial}{\partial m}(k\rho\frac{\partial T_e}{\partial m})-\frac{\alpha_{ei}}{\rho}(T_e-T_i)+J_L$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial t}+P_i\frac{\partial v}{\partial m}=\frac{\alpha_{ei}}{\rho}(T_e-T_i),$$

где ρ — массовая плотность металла, ρ_0 — плотность металла при нормальных условиях, v — скорость, t — время, $x(m,t)$ — траектория частицы с координатой m, m_0 — координата поверхности металла, $P=P_e+P_i$ — полное, электронное и ионное давление, $E=E_e+E_i$ — полная, электронная и ионная внутренняя энергия единицы массы, T_e, T_i — электронная и ионная температуры, k — коэффициент электронной теплопроводности, α_{ei} — коэффициент электронно-ионной релаксации,

$J_L=\frac{F_{abs}}{\tau_L\delta\sqrt{\pi}\rho}exp(-\frac{t^2}{\tau_L^2})exp(-\frac{x(m,t)-x(m_0,t))}{\delta})$ — энергия лазерного излучения, которое поглощается единицей координаты за единицу времени, τ_L — длительность лазер-

ного импульса, F_{abs} — это энергия лазерного излучения, которое поглощается единицей координаты за единицу времени, δ — толщина скин-слоя металла.

Предложенная математическая модель, дополненная уравнениями состояния, была использована для моделирования лазерной абляции металлов (алюминий, медь, никель) в различных средах. Получено хорошее согласование результатов моделирования с экспериментальными данными. Использование разработанного уравнения состояния позволило повысить точность расчета глубины абляции в широком диапазоне плотностей энергий излучения и различных длительностях импульса.

Список литературы

1. Tan D., Sharafudeen K.N., Yue Y., Qiu J., Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: Fundamentals and applications, Progress in Materials Science, 76, 154-228, 2016;
2. Marchington R.F., Arita Y., Tsampoula X., Gunn-Moore F.J., Dholakia K., Optical injection of mammalian cells using a microfluidic platform, Biomedical Optics Express, 1(2), 527-536, 2010;
3. Макаров Г.Н., Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии, УФН, 183(7), 673-718, 2013;
4. Wu C., Zhigilei L.V., Microscopic mechanisms of laser spallation and ablation of metal targets from large-scale molecular dynamics simulations, Applied Physics A, 114(1), 11-32, 2014;
5. Cheng C.W., Wang S.Y., Chang K.P., Chen J.K., Femtosecond laser ablation of copper at high laser fluence: Modeling and experimental comparison, Applied Surface Science, 361, 41-48, 2016;
6. Ivanov D.S., Lipp V.P., Veiko V.P., Yakovlev E., Rethfeld B., Garcia M.E., Molecular dynamics study of the short laser pulse ablation: quality and efficiency in production, Applied Physics A, 117(4), 2133-2141, 2014;
7. Davydov R.V., Anotonov V.I., Equation of state for computer simulation of metal ablation by femtosecond laser pulses, Journal of Physics: Conference Series, 929, 012040, 2017.

Численное моделирование стационарных тепловых режимов солнечного элемента в концентраторном фотоэлектрическом модуле

Попов П. А.[1], Поняев С. А.[1], Шварц М. З.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: pavel.popov@mail.ioffe.ru

Фотоэлектрические модули (ФЭМ) с концентраторами солнечного излучения являются перспективными источниками электрической энергии в силу более высоких значений эффективности преобразования по сравнению с традиционными плоскими солнечными панелями без концентраторов [1]. Одновременно с увеличением КПД солнечных

элементов (СЭ), работающих при высоких энергетических освещённостях, возникает проблема отвода остаточного тепла для предотвращения перегрева фотопреобразователя и соответствующего снижения вырабатываемой ФЭМ электрической мощности. Эксплуатация ФЭМ в условиях повышенных температур окружающего воздуха и при слабом конвекционном отводе тепла будет сопровождаться еще большим увеличением рабочей температуры СЭ с соответствующим падением КПД модуля в целом [2].

Сохранение и поддержание высокой эффективности ФЭМ в широком диапазоне температур окружающего воздуха требует детального анализа процессов теплообмена во всем модуле для определения оптимальной структуры и конструкции системы охлаждения.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования стационарных тепловых режимов работы СЭ в ФЭМ с концентраторами типа «линза Френеля» для одиночной пары «линза – СЭ» в предположении идентичности всех подобных ячеек в модуле и собственно симметрии самого ФЭМ [3].

Основными решаемыми задачами являлись:

1. Расчет стационарного поля температуры в одиночной ячейке ФЭМ с СЭ, закрепленным на различных вариантах радиатора;
2. Анализ влияния различных механизмов теплопередачи на нагрев СЭ;
3. Анализ возможности использования упрощенной тепловой модели одиночной ячейки для инженерного расчета многоэлементного ФЭМ.

В работе рассматривались три варианта конструктивного исполнения системы теплоотвода ФЭМ на основе 8 СЭ. Получены распределения температуры в фотоэлектрической ячейке при различных вариантах радиатора. Оценен вклад каждого из факторов теплообмена на нагрев СЭ. Определена конструкция ФЭМ и радиатора для обеспечения оптимального температурного режима СЭ при стандартных климатических условиях. Определены возможности использования упрощенной модели одиночной ячейки для инженерного расчета тепловых режимов ФЭМ.

Список литературы

1. Martin A. Green, Yoshihiro Hishikawa, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl-Ebinger, Anita W.Y. Ho-Baillie, Solar cell efficiency tables (version 51) // Prog. In Photovolt.: Res. and Appl. 2018.26. P.3-12;
2. Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology (eds C. Algora and I. Rey-Stolle), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, 2016;
3. V. D. Rumyantsev, “Terrestrial concentrator PV systems,” in Concentrator Photovoltaics, A. Luque, and V. Andreev, ed., Springer Series in Optical Sciences, 130, 151–174 (2007).

Особенности передачи опорных и гетеродинных сигналов по волоконно-оптической линии связи в активной фазированной антенной решетке

Ленец В. А.[1], Мороз А. В.[1], Давыдов В. В.[1]

[1]СПбПУ

Эл. почта: lenets03@mail.ru

В настоящее время для решения различных задач требуется постоянная модернизации эксплуатируемых и разработка новых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) информации, как магистрального, так и локального назначения [1-4]. В последние годы, важной составляющей развития локальных телекоммуникационных сетей стали аналоговые ВОСП для передачи сигналов радиодиапазоне [3, 5-7]. Наибольшее применение аналоговые ВОСП локального применения получили в радиолокационных станциях (РЛС) различного назначения [4, 6].

В связи с тем, что эксплуатация РЛС производится в условиях высокой активности помех различного вида, как из вне, так и создаваемые самой РЛС, каналы по которым передаются сигналы управления, а также различная информация, связанная с работой станции, защищены различными экранами, как пассивными, так и активными [4]. Это существенно снижает их гибкость при монтаже, увеличивает объем и вес. В активных фазированных антенных решетках (АФАР), где плотность расположения радиоэлектронных элементов стараются сделать максимально большой, так как необходимо вписаться в заданный объем (иначе антенну невозможно будет разместить на летательном аппарате) взаимное влияние радиопередающих трактов на друг друга очень большое [8]. Для избежание наведения помех на фидерные тракты в АФАР “уязвимые места покрывают поглощающими материалами, но как показывает практика эксплуатации АФАР это не является решением проблемы. Покрытия по различным причинам выходят из строя, теряют свою целостность при проведении ремонтных работ и т.д.

Одними из наиболее уязвимых мест в АФАР для помех являются фидерные тракты от генератора опорного сигнала и гетеродина, так как они имеют высокие требования к стабильности частоты, отношению сигнал/шум и фазовым шумам. Одним из предлагаемых нами вариантов решения данной проблемы – это замена фидерных трактов, передающих эти сигналы, на ВОСП [2-4, 6], так как оптическое волокно не подвержено влиянию высокочастотных помех и имеет хорошие шумовые характеристики при передаче сигналов ВЧ – диапазона, обладает высокой гибкостью и малой массой.

Проведенные предварительные исследования работы АФАР показали, что ширины спектра одномодового оптического волокна в случае передаче по нему опорного и гетеродинного сигнала, которые представляют из себя непрерывные синусоиды, вполне достаточно. Требования к оптическому передающему модулю и фотоприемнику по входной мощности, потерям на преобразование, быстродействию, коэффициенту преобразования при передачи данных сигналов на частотах менее 100 МГц невысокие, по сравнению с тем, когда по ВОСП передаются СВЧ сигналы с частотами 40 ГГц [4, 6].

Особое внимание при проектировании ВОПС было уделено потерям на оптических соединениях, на изгибах и оптическом делители. Так как опорные и гетеродинные сигналы необходимо подавать в зависимости от конструкции АФАР на определенное число блоков.

В результате экспериментов было установлено, что для каждой модели АФАР необходимо подбирать определенные оптические передающие (с заданным уровнем выходной мощности) и приемные (минимальная входная оптическая мощность) модули, так как при большом числе каналов N (оптический делитель 1/N) информация может быть утеряна.

В результате испытания разработанного нами лабораторного макета ВОПС было установлено, влияние фазового набега, который связан с растяжением и сжатием оптического волокна под воздействием температуры, на частотные и амплитудные характеристики передаваемого оптического сигнала несущественны. Даже при колебаниях температуры от — 30 до 50 ^{0}C, так как расстояния, на которые передается оптический сигнал в АФАР менее 20 м [8].

В результате экспериментов нами было установлено, что основной характеристикой, которую необходимо контролировать в первую очередь в данной ВОПС, в отличие от других моделей ВОПС для передачи СВЧ сигналов в РЛС являются искажения в спектрах передаваемого гетеродинного и опорного сигнала.

Список литературы

1. Friman R.L., Fiber–Optic Systems for Communications,Wiley-interscience a John Wiley & Sons, Inc., 496 p, 2012;
2. Reinhold N., Essentials of Modern Optical Fiber Communication (Springer), 346 p, 2016;
3. Silver M, Optical Fiber Communication Systems (Clanrye International), 412 p, 2015;
4. Tarasenko M.Yu., Davydov V.V., Akulich N.V., Lenets V.A., Yalunina T.R., Feature of use direct and external modulation in fiber optical simulators of a false target for testing radar station, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 10531 LNCS, P. 227-232, 2017;
5. Marpaung D., Roeloffzen C., Heideman R., Leinse A., Sales S., Capmany J., Integrated Microwave photonics., Laser & Photonics Reviews., Vol. 7(4), P. 506-538., 2013.;
6. Ermolaev A.N., Krishpents G.P., Davydov V.V., Vysoczkiy M.G., Compensation of chromatic and polarization mode dispersion in fiber-optic communication lines in microwave signals transmittion., Journal of Physics: Conference Series., Vol. 741(1), P. 012171, 2016;
7. Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А., Новые форматы модуляции в оптических системах связи, LIGHTWAVE Russian Edition., № 4., С. 21-30., 2015.;
8. Д.И. Воскресенский, В.И. Степаненко, В.С. Филиппов, 8. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов Под ред. Д.И. Воскресенского, доп. М.: Радиотехника, 3-е изд., 632 с., 2003.

Определение влияния упругих сферических нановключений на нелинейные модули упругости композитов

Семенов А. А.[1], Бельтюков Я. М.[1]

[1]ФТИ

Эл. почта: sanya_sem@mail.ru

В настоящее время все большую популярность приобретают композитные материалы с включениями малого размера. Экспериментально показано, что при определенном выборе материалов и технологии добавление небольшого количества наночастиц в основной материал (матрицу) ведет к существенному изменению упругих модулей [1, 2]. Кроме того, воздействие нановключений на модули 3-го порядка (модули Мурнагана или модули Ландау) может быть гораздо сильнее и может приводить к изменениям в разы [3].

Так как до настоящего времени нелинейные модули упругости композита можно было определить только экспериментально и с большой погрешностью измерений [4], вызывает интерес получить выражения для них из теоретических соображений. Кроме того, одним из методов исследования и диагностики таких материалов является изучение распространения в них объемных солитонов деформации [5]. Эти волны способны распространяться на значительно большие расстояния, чем любые другие волны в твердых телах, без значительного изменения амплитуды и формы. Параметры таких волн, например — амплитуда и скорость, зависят как от линейных модулей упругости материала (например – модуля сдвига K и коэффициента Пуассона ν, так и от нелинейных – модулей Мурнагана l, m, n.

В данной работе исследуется влияние малой концентрации упругих сферических наночастиц на нелинейные модули упругости нелинейной матрицы с помощью метода последовательных приближений. Каждое приближение является линейной задачей, которая может быть решена в рамках теории Эшелби. В результате были найдены эффективные нелинейные эффективные нанокомпозита, которые имеют вид:

$$\begin{pmatrix} l_{\text{eff}} \\ m_{\text{eff}} \\ n_{\text{eff}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} + c \cdot \mathbf{P}_{3\times 4} \cdot \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \\ K \end{pmatrix} + O(c^2) .$$

Где матрица P зависит от модулей Пуассона матрицы и наночастиц, а также от отношения модулей упругости наночастицы и матрицы – их упругого контраста, а K и l,m,n — это модуль сдвига и модули Мурнагана матрицы соответственно.

Заметим, что нановключения обязательно создадут отличные от нуля нелинейные модули упругости композита, даже если бы матрица описывается линейной теорией упругости. Это происходит в связи с проявлением так называемой геометрической нелинейности в связи с неоднородностью среды.

Результаты работы также могут быть полезны для оценки результирующих упругих свойств композита – до его изготовления можно определить необходимую концентрацию наночастиц для достижения требуемых характеристик.

Список литературы

1. D. Stojanovic, A. Orlovic, S. Markovic, V. Radmilovic, P. S. Uskokovic, and R. Aleksic. Nanosilica/PMMA composites obtained by the modification of silica nanoparticles in a supercritical carbon dioxide-ethanol mixture. J Mater Sci 44 6223 (2009);
2. О.А. Москалюк, А.М. Самсонов, И.В. Семенова, В.Е. Смирнова, В.Е. Юдин. Механические свойства полимерных композитов с наночастицами диоксида кремния. Журнал технической физики 87, 266 (2017);
3. А.И. Коробов, В.М. Прохоров, Д.М. Мехедов. Упругие постоянные второго и третьего порядков алюминиевого сплава В95 и композита В95/наноалмаз. ФТТ, 2013, 55, 1,10-13;
4. А. И. Коробов, В.М. Прохоров, Д.М. Мехедов. Физика твердого тела 55, 10–13 (2013).;
5. A.M. Samsonov. Strain solitions in solids and how to construct them. Chapman & Hall/CRC, 2001.

Сокращения в названиях организаций

B. Verkin ILTPE of NASU
B.Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine

DLR, Germany
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Gottingen, Germany

Durban University of Technology, RSA
Durban University of Technology, Republic of South Africa

ETU, Russia
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russia

IEE RAS
Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences

INME RAS
Институт нанотехнологий и микроэлектроники РАН

Institute of Macromolecular Compounds, Russia
Institute of Macromolecular Compounds

ITMO
ITMO University, Russia

KTH, Sweden
KTH Royal Institute of Technology, Sweden

MIET, Russia
National Research University of Electronic Technology, Russia

NIST, USA
National Institute of Standards and Technology, USA

OvGU, Германия
Магдебургский университет им.Отто фон Герике, Германия

SPbPU, Russia
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

SPbU, Russia
Saint Petersburg State University, Russia

SPSIT, Russia
Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia

ААНИИ
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

АГМУ
Алтайский государственный медицинский университет

БГТУ им. В.Г. Шухова
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

БГУ
Белорусский государственный университет

БГУИР
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

ВГТУ
Воронежский государственный технический университет

Сокращения в названиях организаций

ВГУ
Воронежский государственный университет

ВИТИ МИФИ
Волгодонский инженерно-технический институт, Филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

ВНИИФ
Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии

ВолГУ
Волгоградский государственный университет

ВолГТУ
Волгоградский государственный технический университет

ВШОПФ ННГУ
Высшая школа общей и прикладной физики ННГУ

ГАО РАН
Главная астрономическая обсерватория РАН

ГЕОХИ РАН
Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского

Гипрорыбфлот
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по развитию и эксплуатации флота АО Гипрорыбфлот

ДвГУПС
Дальневосточный государственный университет путей сообщения

ИАП РАН
Институт аналитического приборостроения РАН

ИМСС УрО РАН
Институт механики сплошных сред УрО РАН

ИНЦ РАН
Институт цитологии РАН

ИОФ РАН
Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН

ИПМИ КарНЦ РАН
Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»

ИПФ РАН
Институт прикладной физики РАН

ИРЭ РАН
Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН

ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ Кристаллография и фотоника РАН
Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

ИТМО
Университет ИТМО

ИТФ РАН
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау

ИФ СО РАН
Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН

ИЭЭ РАН
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

КГЭУ
Казанский государственный энергетический университет

КрасГМУ
КрасГМУ им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого

КФУ
Казанский федеральный университет

КФУ им. В. И. Вернадского
Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

МГТУ им. Н. Э. Баумана
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

МГУ им. М. В. Ломоносова
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

МИСиС
Национальный исследовательский и технологический университет «МИСиС»

МИФИ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МИЭТ
Национальный исследовательский университет МИЭТ

МФТИ
Московский физико-технический институт

НИИ ФХБ им. А.Н. Белозерского
НИИ Физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского

НИИТОНХ и БТ
НИИ технологии органической, неорганической химии и биотехнологии

НИУ МИЭТ
Московский институт электронной техники

НИУ МЭИ
Московский энергетический институт

НовГУ
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

НПК ТЦ
Научно-производственный комплекс «Технологический центр»

НТЦ УП РАН
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

ООО НТЦ ТПТ
ООО "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике"

ПГНИУ
Пермский государственный национальный исследовательский университет

ПГУ, Белоруссия
Полоцкий государственный университет, Белоруссия

ПетрГУ
Петрозаводский государственный университет

ПИЯФ
Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова

РГПУ
Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена

РКЦ
Российский квантовый центр

РУДН
Российский университет дружбы народов

Сокращения в названиях организаций

СамГМУ
Самарский государственный медицинский университет

Самарский университет
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

САО РАН
Специальная астрофизическая обсерватория РАН

САФУ им. М.В. Ломоносова
Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова

СГТУ
Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина

СГУ
Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

Сколтех
Сколковский институт науки и технологий

СПБАУ РАН
Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН

СПбГТИ
Санкт-Петербургский государственный технологический институт

СПбГТИ
Санкт-Петербургский государственный технологический институт

СПбГУ
Санкт-Петербургский государственный университет

СПбГУТ
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова

СПбПУ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ТГУ
Национальный исследовательский Томский государственный университет

ТПУ
Томский политехнический университет

ТУСУР
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ФИАН
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

ФТИ
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

ЮФУ
Южный федеральный университет

Содержание

Астрономия и астрофизика 3

Использование современных численных и аналитических эфемеридов Луны
Загидуллин А. А., Усанин В. С., Петрова Н. К., Нефедьев Ю. А., Андреев А. О. 3

Анализ глобальной цифровой модели Земли, выполненный с использованием методов фрактальной геометрии и гармонического разложения по сферическим функциям
Демин С. А., Андреев А. О., Демина Н. Ю., Нефедьев Ю. А. 4

Создание имитационных моделей лунных наблюдений
Демина Н. Ю. , Петрова Н. К., Загидуллин А. А., Андреев А. О., Нефедьев Ю. А., Демин С. А.....5

Анализ топоцентрических и гравиметрических данных современных космических миссий
Андреев А. О., Демина Н. Ю., Загидуллин А. О., Петрова Н. К., Нефедьев Ю. А., Демин С. А.....7

Основное состояние и квантование Энергии материи во вселенной Фридмана
Шаврин А., Горобей Н. Н., Лукьяненко А. С. 8

Белые дыры в обобщенном пространстве-времени Вайдья
Вертоградов В. Д., Pankaj Joshi 9

Исследование влияния негравитационных эффектов на некоторые потенциально опасные астероиды
Мартюшева А. А. 10

Исследование потенциально опасных астероидов 2002 AJ129 и 2017 VR12 в периоды их тесных сближений с Землей
Петрова С. Н., Девяткин А. В., Горшанов Д. Л. 10

Уравнение состояния межгалактического вещества ранней Вселенной
Теликова К. Н., Балашев С. А., Штернин П. С. 11

Связь нётеровского и метрического тензоров энергии-импульса для различных теорий тензорных полей
Ильин Р. В., Пастон С. А. 12

Фотоионизация водородоподобных ионов в сильном магнитном поле
Демидов И. В., Потехин А. Ю. 13

Сокращения в названиях организаций

Молекулярные облака HD/H_2 в ранней Вселенной
Косенко Д. Н., Балашев С. А., Иванчик А. В. 13

Систематические эффекты и самосогласованность в методике определения распространенности первичного гелия
Куричин О. А. , Иванчик А. В. 14

Мазерное излучение на гравитационных состояниях на поверхности нейтронных звезд
Тепляков Н. В., Вовк Т. А., Рухленко И. Д., Рождественский Ю. В. 15

Моделирование диффузии ускоренных частиц вблизи бесстолкновительных ударных волн в космической плазме с различным химическим составом
Кропотина Ю. А., Быков А. М., Красильщиков А. М., Левенфиш К. П. 16

Нагрев нейтронных звёзд за счёт диссипации магнитного поля в их ядрах
Офенгейм Д. Д., Гусаков М. Е., Кантор Е. М. 16

Моделирование релятивистской плазмы методом Particle-in-Cell.
Романский В. И., Быков А. М., Осипов С. М. 17

Проблемы прогнозирования огибающей солнечных циклов в терминах TSI методом аналогов
Скакун А. А., Волобуев Д. М. 18

Зависимость ренгеновской поляризации аккрецирующих черных дыр от заряда и момента вращения черной дыры.
Белоновский Алексей, Гнедин Ю. Н., Дымникова И. Г. 19

Открытие экзопланеты KPS-1b, а также обнаружение новых кандидатов в экзопланеты методом транзитной фотометрии. Тайминг экзопланеты TrES-5b. Возможное существование планеты TrES-5c.
Соков Е. Н. 20

4963 Kanroku: Возможно, двойной астероид
Соков Е. Н., Сокова И. А. 21

Диффузия ускоренных частиц и плазменные неустойчивости в астрофизических бесстолкновительных ударных волнах
Осипов С. М., Быков А. М., Кропотина Ю. А. 22

Атомная физика и физика элементарных частиц 24

Nuclear modification factors of Ks and omega mesons in Cu+Au collisions at 200 GeV
Zharko S. V., Berdnikov A. Ya., Berdnikov Ya. A., Kotov D. O., Radzevich P. V. 24

Nuclear modification factors of π0 and η mesons in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=192 GeV
Радзевич П. В., Бердников А. Я., Бердников Я. А., Котов Д. О., Жарко С. В. 25

Phi meson measurements in Cu+Au collisions at 200 GeV and in U+U collisions at 192 GeV
Митранков Ю. М., Бердников Я. А., Бердников А. Я., Котов Д. О. 26

Transportation of exotic fission products targeted for the goals of astrophysical r-process
Simonovski Dimitar, Chenmarev S. V. 27

Interaction between spin polarized alkali atoms.
Картошкин В. А. 29

The mechanism of cumulative proton production in the collision of C^{12} and Be^{8} nuclei at the energies of 0.6, 0.95 and 2 GeV/nucleon
Ларионова Д. М., Ларионова М. М., Борисов В. С., Митранков Ю. М., Соловьев В. Н., Бердников Я. А., Бердников А. Я., Котов Д. О. 30

Отношение множественностей частиц в коалесцентной модели коррелированных кварков
Мосолова Е. О., Борисов В. С., Бердников Я. А., Бердников А. Я. 31

Вычисление поправки Бора-Вайсскопфа для постоянной сверхтонкой структуры.
Просняк С. Д., Скрипников Л. В. 33

Теплофизические и электрофизические свойства монокристаллического вольфрама
Солнцева Екатерина, Таубин М. Л., Чесноков Д. А. 33

Observation of Polarized Alkali Atoms in Experiments on Optical Orientation in a He–Rb and He-Cs Mixture under Conditions of a Pulsed Gas Discharge
Dovator Nicolai, Dmitriev S. P., Kartoshkin V. A., Klementiev G. V. 34

Биофизика 36

Спектрометрический метод измерения поглощения света листьями растений
Кулешова Т. Э., Середин И. С., Щеглов С. А., Блашенков М. Н., Чумаченко А. В., Феофанов С. В., Кирадиев В. К., Одноблюдов М. А. 36

Исследование изменений внутриклеточной морфологии при фотодинамическом воздействии методом голографической томографии
Рогова Д. А., Белашов А. В., Беляева Т. Н., Васютинский О. С., Корнилова Е. С., Семенова И. В. 38

Study the effect of temperature on the physiological properties of ascorbic acid
Qassime Muhannad M, Goryacheva V. A., Al-Alwani A. J., Lugovitskaya T. N., Shipovskaya A. B., Glukhovskoy E. G. 40

Сокращения в названиях организаций

Разработка методов повышения достоверности результатов диагностики состояния человека пульсоксиметром
Гревцева А. С., Давыдов В. В., Грешневиков К. В. 41

Сравнительный анализ изменений морфологических параметров клеток рака яичника при химиотерапии диоксадэтом и цисплатином
Жихорева А. А., Белашов А. В. , Беспалов В. Г., Васютинский О. С., Жилинская Н. Т., Романов В. А., Семенов А. Л., Семенова И. В. 43

Алгоритм контроля качества сигнала ЭКГ, полученного с использованием тканевых электродов.
Некрасов И. А., Ван Г. В.. 44

Алгоритм кластеризации QRS-комплексов электрокардиосигнала
Ван Г. В., Некрасов И. А. 46

Исследование одиночных клеток и клеточных популяций с помощью электрической импедансной спектроскопии во временном представлении
Ступин Д. Д., Корнев А. А. 48

Локальные особенности фазовой синхронизации вызванных сигналов МЭГ человека
Панищева С. Н., Панищев О. Ю., Демин С. А., Латыпов Р. Р. 50

Применение переменного магнитного поля для повышения эффективности выделения ДНК на магнитном сорбенте.
Петров Д. Г., Антифеев И. Е., Константинова Н.Н, Курочкин В. Е., Дженлода Р. Х., Шкинёв В. М. 51

Моделирование процессов нуклеации и роста кристаллов белка в капиллярах
Соколовский А. С., Беседина Н. А., Дубровский В. Г. 52

Исследование времен жизни и спектров люминесценции флуоресцеинов CF и MitoFluo в растворе в присутствии липосом
Бельтюкова Д. М., Аббасов В. Р., Антоненко Ю. Н., Белик В. П., Васютинский О. С., Котова Е. А., Семенова И. В. 53

Локализационная микроскопия структур, формируемых белком FtsZ в живых клетках Mycoplasma gallisepticum
Ведяйкин А., Дробышева А. В., Вишняков И. Е., Ходорковский М. А. 54

Использование флуоресцентной микроскопии в изучении влияния концентрации белков системы Esp1396I на степень защиты от бактериофага
Смирнов С. В., Морозова Н. Е., Ходорковский М. А., Северинов К. В. 55

Матфизика и численные методы 57

Локализация источников излучения от печатной платы в ближней зоне с применением вейвлет анализа
Скворцов И. В., Бочкарев В. В., Латыпов Р. Р. 57

Анализ устойчивости решений кинетических уравнений для моделирования течений газа при произвольном показателе адиабаты
Марнопольская Е. С., Кривовичев Г. В. 58

О разностной схеме второго порядка для решения системы уравнений одномерной гемодинамики
Веригина М. А., Кривовичев Г. В. 59

Applications of differential equations with logarithmic nonlinearity in physics
Zloshchastiev Konstantin 60

Численное моделирование динамики свободной границы фазового перехода «металл-гидрид»
Родченкова Н. И., Заика Ю. В., Грудова К. В. 60

Учет взаимодействия с внешним электромагнитным полем при моделировании методом квантового Монте-Карло системы поляритонов в условиях оптической накачки
Карцев П. Ф., Кузнецов И. О. 61

Процедура учета вихрей Абрикосова в рамках численного решения уравнений Гинзбурга-Ландау
Корчагин Д. С., Карцев П. Ф. 62

Скейлинг свободной энергии в модели димеров и шестивершинной модели
Nazarov Anton, Белов П. А. 64

Наноструктурированные и тонкопленочные материалы 65

Nanostructured Core-Shell Type Magnetic Particles for Biomedical Applications
Kamzin Aleksandr 65

Измерение магнитострикции насыщения аморфных сплавов $Fe_{80-x}Co_xP_{14}B_6$ методом малоуглового вращения намагниченности
Севериков Василий, Секирин И. В, Игнахин В. С, Гришин А. М. 66

Влияние эндоэдрального фуллерена на молекулярную подвижность полифениленоксида.
Кононов А. А., Кастро Р. А. 67

Сокращения в названиях организаций

The method of cathodic polarization and memory electrical switching in hydrated amorphous vanadium dioxide
Kuldin Nikolay, Cheremisin Alexander 68

Получение наночастиц меди и оксида меди методом химического восстановления
Беглецова Н. Н., Селифонова Е. И., Чумаков А. С., Аль-Алвани А. Ж. К., Чернова Р. К., Севостьянов В. П., Глуховской Е. Г. 69

Формирование металлического покрытия под ленгмюровским монослоем
Чумаков Алексей, Ермаков А. В., Беглецова Н. Н., Шинкаренко О. А., Аммар Аль-Альвани Ж. К., Глуховской Е. Г. 71

Влияние температуры на самосборку квантовых точек в растворе жидких кристаллов
AL-Alwani Ammar, Chumakov A. S., Shinkarenko O. A., Begletsova N. N., Qassime M. M., Venig S. B., Glukhovskoy E. G. 72

Самоорганизация кластеров в однородно неупорядоченных полимерных нанокомпозитных материалах
Спиров К., Красовский А. Н., Боридько Л. Ш., Шмыков А. Ю. 73

Исследование процессов формирования наноструктур In/AlGaAs методом капельной эпитаксии
Ерёменко М. М., Михайлин И. А., Балакирев С. В., Солодовник М. С., Агеев О. А. 74

Электрические свойства композитных плёнок GO:TiO_2 и PEDOT:TiO_2
Базанова А. А., Алешин А. Н. 76

Кельвин-зонд микроскопия монослоев $MoSe_2$ на графене
Бородин Б. Р., Алексеев П. А., Дунаевский М. С., Бенимецкий Ф. А., Лебедев С. П., Лебедев А. А. 77

Исследование оптических свойств мембран поликристаллического анодного оксида алюминия в инфракрасной области спектра
Муратова Е. Н., Матюшкин Л. Б., Чернякова К. В., Врублевский И. А. 79

Магнитоплазмонная гетероструктура на основе наночастиц золота и пленок феррита-граната
Комаров Р. С., Белотелов В. И., Калиш А. Н., Кожаев М. А., Бержанский В. Н., Шапошников А. Н., Каравайников А. В., Прокопов А. Р. , Томилин С. В. 80

Термодинамический анализ образования соединений в системах кремний-углерод-металл
Григорьев М. Н., Мясоедова Т. Н., Плуготаренко Н. К. 82

Получение тонких пленок и порошков TiO_2 как фотоактивных материалов, допированых наночастицами металлов, и исследование их характеристик.
Алиев С. А., Трофимов Н. С., Чехлова Т. К., Заев Д., Михаленко И. И. 83

Ионизационный сенсор газа с чувствительным элементом на основе углеродных наноструктур с развитым рельефом
Резван А. А., Климин В. С. 85

Исследование нанокристаллических пленок ZnO для мемристорных структур.
Хахулин Д. А., Вакулов З. Е. , Томинов Р. В. , Смирнов В. А. , Чон-Гул Юн, Агеев О. А. .. 87

Исследование процессов локального ионно-стимулированного осаждения углерода для формирования зондов для нанодиагностики
Коломийцев А. С., Шандыба Н. А., Панченко И. В., Лисицын С. А. 88

Влияние условий выращивания методом MOCVD на однородность по толщине эпитаксиальных слоёв GaInAsP, полученных на InP
Маричев Артем, Левин Р. В., Пушный Б. В., Гагис Г. С., Васильев В. И., Бер Б. Я., Попова Т. Б., Казанцев Д. Ю. 89

Модификация поверхности оконного стекла для изготовления солнечных элементов
Осипов Н. А., Авдеев С. П., Гусев Е. Ю. 91

Проводящие высокоаспектные зонды с Pt/C нановискерами для изучения поверхностного потенциала объектов сложной формы методом «Кельвин проб»
Жуков М. В., Комиссаренко Ф. Э. 93

Усиление скорости спонтанной эмиссии в планарных металл-органических структурах.
Морозов К. М., Иванов К. А., Selenin N., Mikhrin S., de Sa Pereira D., Menelaou C., Monkman A. P., Калитеевский М. А. 95

Modification of CNT arrays morphology by nanosecond laser treatment
Ryazanov R. M., Gerasimenko A.Yu., Kitsyuk E. P., Pavlov A. A., Savelyev M. S. 96

Unconventional magnetic behavior of polymer composite with single and multilayer graphene flakes
Sitdikov R. R., Semenikhin P. V. , Volkov M. P., Ionov A. N., Nikolaeva M. N. 97

Особенности АС-проводимости в системе с двумя подзонами пространственного квантования
Дмитриев А. А., Дричко И. Л., Смирнов И. Ю. 99

Распределение электронной плотности наноразмерных структур во внешнем электрическом поле
Дробышев А. А., Головинский П. А. 100

Исследование электрофизических свойств пористого анодного TiO_2 модифицированного углеродом в зависимости от условий комбинированной термообработки
Савчук Т. П., Якубов А. О., Дронов А. А., Гаврилин И. М., Лазаренко П. И., Гаврилов С. А.. 102

Сокращения в названиях организаций

Получение нанокомпозита УНТ-кремний методом плазмохимического осаждения для микро- и наномеханических систем
Гусев Е. Ю., Ильин О. И., Житяева Ю. Ю., Рудык Н. Н. 103

Диэлектрические свойства термопластичного полиимида Р-СОД в области низких температур
Дао Хонг Тхи , Кастро Р. А. 105

Fano Resonances in Halide Perovskite Nanoparticles
Tiguntseva E. Y., Baranov D. G., Pushkarev A. P., Komissarenko F. E., Zakhidov A. A., Shegai T., Makarov S. V. 106

Электрооптические свойства InAs и InGaAs квантовых точек в GaAs фотопреобразователях
Салий Р. А., Минтаиров М. А., Минтаиров С. А., Шварц М. З., Калюжный Н. А. 107

Study of the formation of nanostructures during droplet epitaxy of In on the Ga-stabilized nanopatterned substrates
Балакирев С. В., Еременко М. М., Михайлин И. А., Солодовник М. С., Агеев О. А..... 109

Porous silicon and graphene-based nanostructures for novel solar energy systems
Smerdov Rostislav, Mustafaev A. S., Spivak Yu.M., Moshnikov V. A. 110

Низкотемпературные электронные свойства пленок металлоорганических перовскитов
Ершова А. М., Овезов М. К., Алешин А. Н. 112

Формирование Ленгмюровских монослоев с включениями наночастиц никеля
Шинкаренко О. А., Чумаков А. С., Аргунов Е. В., Аль-Алвани А. Ж. К., Цветкова О. Ю., Захаревич А. М., Глуховской Е. Г. 113

Фотоиндуцированный перенос электрона от квантовой точки к наночастице диоксида титана в многослойных гибридных структурах
Колесова Е. П., Маслов В. Г., Cleary Olan, Гунько Ю. К., Орлова А. О. 114

Газочувствительные тонкопленочные оловосодержащие материалы
Зубенко Н. А., Семенистая Т. В. 116

Nonlocal excitonic effects in Mie-resonant halide perovskite nanoparticles
Berestennikov A. S., Iorsh I. V., Makarov S. V. 117

Исследование совершенства эпитаксиальных тонких пленок ферритов-гранатов
Максимов Г. С., Наухацкий И. А, Максимова Е. М. 119

Влияние на электрический транспорт в графене его заряженного интерфейса с водными растворами
Бутко А. В., Бутко В. Ю., Лебедев С. П., Смирнов А. Н. , Давыдов В. Ю., Лебедев А. А., Кумзеров Ю. А. 120

Особенности контроля состояния текущей среды рефрактометром
Гребеникова Н. М., Давыдов В. В. ... 121

Модифицированный метод лазерной триангуляции
Адамов А. А., Баранов М. С., Храмов В. Н., Абдрахманов В. Л., Голубев А. В., Чечеткин И. А. ... 123

Исследование статистического уширения в твёрдых растворах InGaN
Артеев Д. С., Сахаров А. В., Заварин Е. Е., Лундин В. В., Смирнов А. Н., Давыдов В. Ю., Яговкина М. А., Усов С. О., Цацульников А. Ф. ... 125

Исследование динамики решетки смешанных кристаллов $HoAl_{3-x}Ga_x(BO_3)_4$ (x = 0.5, 1, 3)
Еремеев Ю. А., Просников М. А., Гудим И. А., Давыдов В. Ю., Смирнов А. Н., Писарев Р. В. ... 126

Светоиндуцированная линза в прозрачной наносуспензии
Овсейчук О. О., Иванова Г. Д., Иванов В. И. ... 127

Моделирование оптических схем малогабаритных спектрометров
Рамазанов А. Н., Кострин Д. К. ... 128

Хемометрический анализ спектров комбинационного рассеяния для оценки пригодности костной ткани при производстве биоимплантатов
Фролов О. О., Тимченко П. Е., Тимченко Е. В., Волова Л. Т. ... 129

Спектральный анализ имплантов из твердой мозговой оболочки
Кийко Н. К. , Тимченко П. Е. , Тимченко Е. В. , Фролов О. О., Кулабухова А. Ю. , Волова Л. Т. ... 131

Применение метода спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки качества хонропластики в эксперименте на кроликах
Маркова М. Д., Тимченко Е. В., Тимченко П. Е., Долгушкин Д. А., Волова Л. Т., Лазарев В. А., Тюмченкова А. С. , Тихомирова Г. П. ... 132

Усиление эффекта Фарадея в магнитоплазмонных двумерных кристаллах за счет возбуждения ортогональных плазмонных колебаний
Кричевский Д. М., Кузьмичев А. Н., Калиш А. Н., Белотелов В. И. ... 134

Оптически когерентное торможение нанокристаллов, легированных ионами иттербия
Вовк Т. А., Иванов А. В., Рождественский Ю. В. ... 135

Спектроскопия комбинационного рассеяния для оценки экстраклеточных матриксов аортальных клапанов сердца в процессе их изготовления
Шалковская П. Ю., Тимченко Е. В., Тимченко П. Е., Волова Л. Т., Трапезников Д. С. 136

Сокращения в названиях организаций

Электрический и магнитный отклики в диэлектрических метаматериалах
Маслова Е. 138

Исследование наногетероструктур на основе полупроводниковых нитридов методом фотолюминесценции
Ларченко А. С., Ваталев О. С., Ведель Е. В. 139

Обратный поток вектора Пойнтинга при острой фокусировке оптических вихрей
Стафеев С. С., Налимов А. Г., Котляр В. В. 140

Анализ спектральных особенностей модели остеопороза костной ткани крыс и эффективности его лечения гидроксиапатитом
Тюмченкова А. С., Тимченко Е. В., Тимченко П. Е., Писарева Е. В., Власов М. Ю., Волова Л. Т., Федорова Я. В. 142

Рамановская и ЗИР спектроскопия сверхвысокого изотопического разрешения для задач биомедицины
Гришканич А. С., Рузанкина Ю. С., Жевлаков А. П., Чубченко Я. К. , Конопелько Л. А.. 143

Многочастотный оптически детектируемый магнитный резонанс нулевого поля в азотно-вакансионных центрах в кристалле алмаза.
Дмитриев А. К., Вершовский А. К. 144

Исследование изменения знака нелинейно-оптического отклика электрооптического кристалла ниобата лития в условиях некогерентной фоновой подсветки
Пустозеров А.В, Перин А. С. Шандаров В. М. 146

Оптическое индуцирование дифракционных структур в фоторефрактивном кристалле ниобата лития бесселеподобными световыми полями
Инюшов А. В., Трушников И. А., Перин А. С. 148

Экспериментальное исследование преобразования гауссовых пучков в бесселеподобные голографическими фазовыми транспарантами в фотополимерных материалах
Семкин А. О., Шарангович С. Н., Долгирев В. О., Сон Д. И. 149

Влияние динамической решетки инверсии населенностей активной среды на горячие моды сверхизлучающего лазера с распределенной обратной связью встречных волн
Рябинин И. С., Кочаровская Е. Р., Кочаровский Вл.В. 150

Исследование пространственной модуляции параметров канальных волноводных структур, оптически индуцированных в кристалле ниобата лития с фоторефрактивной поверхностью
Безпалый А. Д., Перин А. С., Шандаров В. М. 152

Оптическое отражение и люминесцентное рециклирование в солнечном элементе с 1D фотонной структурой
Минтаиров М. А., Левина С. А., Емельянов В. М., Филимонов Е. Д., Шварц М. З. 154

Спектроскопия возбуждения фотолюминесценции массивов квантовых точек InGaAs/GaAs в широком диапазоне температур
Рыбалко Д. А., Надточий А. М., Максимов М. В. 156

Применение лидарных методов в интересах промысловой океанографии
Горяинов В. С., Бузников А. А., Черноок В. И. 158

Optics of low-dimensional plasmon-excitons in metal-semiconductor nanostructures
Korotchenkov A. V., Kosobukin V. A. 159

Моделирование формирования оптических вихрей серебряными спиральными зонными пластинками
Козлова Е. С., Котляр В. В. 160

Изучение особенностей изменения фотолюминесценции листьев растения при их температурной обработке
Мороз А. В., Рудь В. Ю. 162

Особенности поляризационной фоточувствительности в структурах на основе CdTe
Жариков И. А., Рудь В. Ю. 164

Акустооптический перестраиваемый источник света
Хохлов Д. Д., Мачихин А. С., Пожар В. Э. 165

Оптоэлектронные приборы 167

Особенности регистрации вариаций магнитного поля квантовым датчиком на основе феррофлюидной ячейки.
Логунов С. Э., Давыдов В. В., Мазинг М. С. 167

Влияние легирования барьерных слоёв на эффективность фотолюминесценции квантовых ям спектрального диапазона 1550 нм
Колодезный Е. С., Рочас С. С., Курочкин А. С., Бабичев А. В., Новиков И. И., Гладышев А. Г., Егоров А. Ю., Карачинский Л. Я., Савельев А. В. 169

Люминесценция гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgCdTe и InAsSb
Семакова А. А., Мынбаев К. Д., Баженов Н. Л. 170

Нагрев фотоэлектрического преобразователя падающим излучением: температура перегрева
Минтаиров М. А., Евстропов В.В, Минтаиров С. А., Шварц М. З., Калюжный Н. А. 171

Волноводный направленный ответвитель на основе золь-гель пленок
Павлов С. В., Чехлова Т. К. 173

Сокращения в названиях организаций

Трехволновая оптоэлектронная система мониторинга процесса гемодиализа
Степанова О. С., Коноплев Г. А., Солнцев Н. А., Земченков А. Ю., Герасимчук Р. П., Фрорип А. 174

взаимосвязь потерь на распространение с геометрическими параметрами оптических микроволноводов
Шапран Д. А., Зарецкая Г. А., Дроздовский А. В. 175

Исследование особенностей применения отражательного эшелона в задачах кинетической спектроскопии и информационной оптике
Глухов В. А., Сясько А. В., Толмачев Ю. А. 177

Исследование приборных гетероструктур на основе напряженных сверхрешеток InAs/GaSb, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии
Федоров И. В., Левин Р. В., Пушный Б. В., Зегря Г. Г., Баженов Н. Л., Усикова А. А., Ратушный В. И. 178

Инжекционные лазеры на основе многослойной активной области переходной размерности
Payusov Alexey, Шерняков Ю. М., Серин А. А., Надточий А. М., Минатиров С. А., Калюжный Н. А., Кулагина М. М., Гордеев Н. Ю., Максимов М. В., Жуков А. Е. 179

Многопереходные приемники-преобразователи для информационно-энергетических систем
Емельянов В. М., Филимонов Е. Д., Шварц М. З. 180

Органические солнечные элементы на основе системы ZnPc:C_{60}
Павлова М. Д., Ламкин И. А., Тарасов С. А. 182

Resonant silicon nanoparticles for efficiency and stability enhancement of perovskite solar cells
Фурасова А., Макаров С., Zahidov A. 183

Создание и исследование органических излучателей, содержащих коллоидные квантовых точки селенида кадмия.
Михайлов И., Еремеев М. А., Дегтерев А. Е., Ламкин И. А., Лебедева Т. Д., Тарасов С. А., Соломонов А. В. 184

Исследование нелинейных передаточных характеристик спин-волнового оптоэлектронного активного кольцевого резонатора
Витько В. В., Никитин А. А., Устинов А. Б., Калиникос Б. А. 185

Комбинированные пленки ITO в качестве прозрачных контактов для синих AlInGaN светодиодов
Павлюченко А. С., Марков Л. К., Смирнова И. П., Левицкий В. С. 187

Технологические аспекты формирования элементов оптоэлектронной системы съема информации шаровых гироскопов
Юльметова О. С., Туманова М. А., Щербак А. Г. 189

Поверхностные явления 191

Resonance spectra of the electron-ripplon oscillations in a two-dimensional electron crystal over liquid helium
Sharapova Iryna, Syvokon V. E. 191

Принципы построения полупроводниковой Фурье-спектроскопии для газового анализа на примере разработки тонкопленочных датчиков концентраций летучих углеводородов с помощью редкоземельных элементов
Казаков С. А., Гревцев М. А., Хавров Г. Д. 191

Гидрофобные покрытия на основе кремнеземсодержащего сырья низкого качества
Данилов В. Е., Русинова Я. М., Айзенштадт А. М. 193

Лазерно-индуцированная полевая эмиссия электронов из металла в низкочастотном пределе
Михин Е., Дробышев А. А., Головинский П. А. 195

Глиоксаль и его производные для стабилизации алюмосиликатных коллоидно-дисперсных систем
Соколова Юлия, Айзенштадт А. М., Мальков В. С., Строкова В. В. 196

Влияние динамики линии контакта на колебания зажатого пузырька в неоднородном электрическом поле
Кашина М. А., Алабужев А. А. 198

Микрофлюидные устройства для петлевой изотермической амплификации
Тупик А. Н., Посмитная Я. С., Рудницкая Г. Е., Евстрапов А. А. 200

Математическое моделирование систем диагностики поверхности на основе полевой эмиссии
Луньковский М. Н., Никифоров К. А. 201

Приборы и материалы ТГц и СВЧ диапазона 203

Уменьшение сдвига частоты центрального резонанса квантового стандарта частоты на атомах цезия-133
Петров А. А., Давыдов В. В., Лукашев Н. А., Валов А. П. 203

Сокращения в названиях организаций

Моделирование формирования и пространства взаимодействия ленточных электронных пучков в усилителях терагерцевого диапазона
Данилушкин А. В., Бурцев А. А., Навроцкий И. А. 205

Спин-волновой согласованный фильтр для сигналов с амплитудной модуляцией
Мартынов М. И., Никитин А. А., Семенов А. А., Калиникос Б. А. 206

Компрессия плотных электронных сгустков собственными полями
Опарина Ю. С., Савилов А. В., Бандуркин И. В. 208

Анализ дифференциальных параметров вакуумных микротриодов в статическом режиме
Соколов И. А., Стребко В. А. , Никифоров К. А. 209

Интерферометр Маха-Цендера на основе тонкопленочных мультиферродных структур
Никитин А. А., Никитин Ан. А., Устинов А. Б. 210

Исследование пространственно-периодических тонкопленочных мультиферроидных структур на основе копланарной линии передачи
Никитин А. А., Устинов А. Б., Никитин Ан. А. 212

Примеси и дефекты в твердом теле 214

Влияние нейтронного облучения на состояние водорода в CVD алмазных пленках
Хомич А. А., Деревяго А. Н., Поклонская О. Н., Хомич А. В., Хмельницкий Р. А., Поклонский Н. А., Ральченко В. Г. 214

Оптическая квантовая термометрия и магнитометрия, основанная на антипересечении и кросс релаксации спиновых центров окраски в карбиде кремния.
Бреев И. Д., Анисимов А. Н., Солтамов В. А., Баранов П. Г. 215

Определение параметров ловушек в сцинтилляционных гранатах по корреляции ТСЛ и вторичных компонент кинетики рентгенолюминесценции.
Тухватулина Т. А., Веневцев И. Д., Михрин С. Б. 217

Теоретическое и экспериментальное определение концентрации дислокационных дефектов в титановом сплаве ВТ6 после холоднокатаной пластической деформации
Бабихина М. Н., Лаптев Р. С., Кудияров В. Н. 218

Исследование анизотропии параметров тонкой структуры боратов $MeBO_3$ (Me = Fe, In, Ga)
Замковская А. И., Максимова Е. М., Наухацкий И. А. 219

Влияние нановключений на макроскопическую жесткость аморфных систем
Конюх Д. А., Бельтюков Я. М., Паршин Д. А. 220

Физика и технология преобразования энергии 222

Генерация тока при деформации вертикально ориентированных углеродных нанотрубок
Коньшин А. А., Ильина М. В., Ильин О. И., Рудык Н. Н., Агеев О. А. 222

Применение сегнетоэлектриков в технологиях одновременного повышения удельной мощности и удельной энергии электропривода легкого транспорта
Зубцов В. И. 223

Наноразмерные термитные материалы для устройств преобразования энергии в термоэлектрических батарях
Немцева С. Ю., Лебедев Е. А., Сорокина Л. И., Шаман Ю. П., Рязанов Р. М., Громов Д. Г., Гаврилов С. А. 225

InAs квантовые точки для каскадных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов
Паньчак Александр, Минтаиров С. А., Минтаиров М. А., Салий Р. А., Шварц М. З., Калюжный Н. А. 227

Малоразмерные концентраторы солнечного излучения из термопластичных материалов
Филимонов Е. Д., Левина С. А. , Емельянов В. М., Солуянов А. А., Шварц М. З. 228

Физика квантовых структур 230

Влияние кулоновского взаимодействия носителей заряда в волноводной области на порог инверсии лазера на квантовых ямах
Карпова А. А., Зегря Г. Г. 230

Quickly tunable electromagnetic environment for quantum electric circuits
Sevriuk Vasilii , Tan K. Y. , Masuda S., Goetz J., Partanen M., Silveri M., Hyyppä E., Govenius J., Lake R., Vesterinen V., Grönberg L., Hassel J., Simbierowicz S., Gunyho M., Keränen A., Tuorila J., Ala-Nissila T., Hazra D., Grabert H., Möttönen M. 231

Влияние диполь-дипольного взаимодействия на динамику квантовых корреляций в двойной модели Джейнса-Каммингса
Евсеев М. М., Башкиров Е. К. 232

Внутренние потери излучения в полупроводниковых лазерах с напряженными квантовыми ямами InGaAsP/InP
Павлов Н. В., Зегря Г. Г. 234

Механизм влияния зарождающейся сверхпроводящей фазы на электронные свойства в слоистом материале FeSe
Могилюк Тарас, Григорьев П. Д., Кешарпу К. К. 236

Сокращения в названиях организаций

Создание многопереходного солнечного элемента на основе материалов $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$.
Лухмырина Татьяна, ... 237

Моделирование нанокомпозитных полевых эмиттеров в COMSOL Multiphysics с использованием данных полевого эмиссионного проектора
Чумак М. А., Колосько А. Г., Филиппов С. В. , Попов Е. О. 238

Моделирование стохастических процессов в эмиссионных характеристиках источников свободных электронов
Пирогов Ю. В., Колосько А. Г., Филиппов С. В., Попов Е. О. 240

Анализ регулярности микроскопических эмиссионных центров нанокомпозитного полевого катода
Буров А. Н., Марков А. А., Колосько А. Г., Филиппов С. В., Попов Е. О. 242

Исследование эффекта Парселла в структурах с таммовским плазмоном с органической активной областью
Морозов К. М., Иванов К. А., Selenin N. , Mikhrin S., de Sa Pereira D, Menelaou C., Monkman A. P., Kaliteevski M. A. 244

How fullerenes shell affects the vacancy decay in caged atoms
Amusia Miron Ya, Chernysheva Larissa V. 245

Влияние доменной структуры на сверхбыструю магнитную динамику, возбуждаемую лазерными импульсами
Храмова А., Кожаев М. А., Чернов А. И., Пятаков А. П., Савочкин И. В., Белотелов В. И. 245

Синтез методом молекулярно-пучковой эпитаксии и свойства III-V ННК на гибридных подложках SiC/Si
Резник Р. Р. 247

Features of the lasers characteristics of based on nitride quantum wells
Медведева Е. Е., Коноплев С. С., Савельев А. В., Жуков А. Е. 248

Физика плазмы, гидро- и аэродинамика 249

AC plasma torch operating on a mixture of air and methane
Subbotin D. I., Surov A. V., Popov S. D., Serba E. O., Obraztsov N. V., Spodobin V. A., Popov V. E., Kuchina J. A. 249

Metal ferrites syntesis by AC plasma torch
Kuchina J. A., Subbotin D. I., Kuznetsov V. E., Popkov V. I., Popov V. E., Cherepkova I. A., Obraztsov N. V. 250

Численное исследование процесса схлопывания парового пузыря в жидкости вблизи твердой стенки
Махнов А. В. 251

Методика коррекции поля средней скорости вентиляционных течений: обоснование на основе расчетов по методу моделирования крупных вихрей
Засимова М. А., Иванов Н. Г. 253

Особенности формирования плазменного канала в газе низкого давления при транспортировке низкоэнергичного электронного пучка в магнитном поле пробкотрона
Новицкий А. А., Андреев В.В 255

Исследование режимов эффективной светоотдачи резонансного микроволнового разряда инертных газов в форвакуумном диапазоне давлений
Корнеева М. А., Андреев В. В. 256

Thermal energy confinement time scaling with Ip and BT in Globus-M H-mode
Киселев Е. О., Patrov M. I., Kurskiev G. S., Bakharev N. N., Gusev V. K., Telnova A.Yu., Khromov N. A., Miroshnikov I. V., Petrov Yu.V., Sakharov N. V., Minaev V. B., Sladkomedova A. D., Shchegolev P. B., Solokha V. V., Tokarev V. A., Tolstyakov S. Yu. 258

Получение абсолютно калиброванных спектров излучения Xe лазерной плазмы в диапазоне дальнего ультрафиолета для целей EUV литографии.
Буторин П. С., Калмыков С. Г., Сасин М. Э. 259

Time dependent 2-dimensional model of an alternating current arc
Obraztsov N. V., Frolov V. Ya., Subbotin D. I., Popov V. E., Surov A. V. 260

Моделирование течения газа в разрядной камере при размыкании контактной системы в пакете OpenFOAM
Куракина Н. К., Пинчук М. Э., Будин А. В., Смирновский А. А. 261

Применение схемы с искусственной вязкостью для численного решения нестационарной квазиодномерной задачи о течении двухфазной среды по каналу на основе двухжидкостного подхода
Смирнов С. И., Смирнов Е. М., Булович С. В. 262

Экспериментальное исследование динамического сопротивления плазмы лазеров тлеющего разряда
Киселев А. С., Смирнов Е. А. 263

Энергетический подход к анализу лабораторных установок высокоскоростного метания для изучения физических процессов при высоких давлениях
Быков Н. В. 265

Экспериментальные методы исследования эффекта электронного охлаждения
Безверхний Н. О., Бобашев С. В., Монахов Н. А., Сахаров В. А. 266

Сокращения в названиях организаций

Влияние внешней цепи на устойчивость состояний диода Пирса
Кузнецов В. И., Герасименко А. Б. 268

Исследование влияния внешнего электрического поля на функцию распределения ионов в слабо ионизованном газе для различных сечений рассеяния
Герасименко А. Б., Бакалейников Л. А., Флегонтова Е. Ю. 269

Структура вихревого течения в бифуркации кровеносного сосуда: сопоставление результатов пациент-ориентированных расчетов и клинических доплеровских измерений
Гатаулин Я. А., Юхнев А. Д., Зайцев Д. К., Смирнов Е. М., Куликов В. П., Кирсанов Р. И. 270

Исследование параметров газоразрядной ячейки высокого давления в импульсном режиме работы
Юрченков М. И., Рыков А. А. 271

Численное моделирование изменения аэродинамического сопротивления тела при подводе энергии в зоне перед ним
Мисюрина В. А., Поняев С. А. 272

Применение рельсового ускорителя плазмы для исследования и модификации поверхности твердых тел
Твердохлебов К. В., Поняев С. А., Куракин Р. О., Жуков Б. Г. 274

Анализ возможностей алгебраических моделей ламинарно-турбулентного перехода
Стабников А. С., Гарбарук А. В. 275

RANS и зонный RANS-IDDES расчеты эволюции турбулентного следа за пластиной под воздействием неблагоприятного градиента давления
Гусева Е. К., Травин А. К., Burnazzi M., Knopp T. 276

Тестирование вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности применительно к течению Куэтта с градиентом давления
Никифорова Кристина, Гусева Е. К., Гарбарук А. В. 278

Тестирование SST-HL модели турбулентности для расчета обтекания крыловых профилей в широком диапазоне углов атаки.
Матюшенко А. А., Гарбарук А. В. 279

Модовый анализ альфвеновских волн в плазме токамака ТУМАН-3М.
Абдуллина Г., Аскинази Л. Г., Белокуров А. А., Жубр Н. А., Корнев В. А., Лебедев С. В., Разуменко Д. В., Тукачинский А. С. 280

Физика ферроиков 282

Тепловые и электрофизические свойства композитных керамик со структурой перовскита, легированных магнитными ионами
Мыльников И. Л., Семёнов А. А., Дедык А. И., Павлова Ю. В., Буровихин А. П., Пахомов О. В., Анохин А. С. 282

Photo-voltaic effects in the metal-ferroelectric-metal sandwich structure
Perkov Y. O., Ivanov V. I. 284

Исследование электрофизических свойств и электрокалорического отклика в твердом растворе магниобата свинца – цинкониобата свинца (PMZN)
Анохин А. С., Еськов А. В., Пахомов О. В., Буй М. Т., Семенов А. А., Мыльников И. Л. . 285

Оптическое возбуждение спиновых волн в тонких пленках галфенола
Красильникова У. Д., Хохлов Н. Е., Шелухин Л. А., Калашникова А. М., Rushforth A. W., Щербаков А. В. 286

Другие вопросы физики 288

Heat and mass transfer processes during combustion of solid fuel
Beketayeva M., Askarova A., Bolegenova S., Maximov V..... 288

Особенности формирования структуры сигнала ядерного магнитного резонанса в слабых магнитных полях
Мязин Н. С., Давыдов В. В. 289

Метод функционального интегрирования в теории двухкомпонентных растворов
Шнайдер А. А., Захаров А. Ю., Евстигнеева Н. В..... 290

Исследование температурных зависимостей упруго-пластических свойств кристаллов GaN
Гузилова Л. И., Кардашев Б. К., Николаев В. И. 292

Исследование влияния гидродинамических и конструкционных параметров микрофлюидного устройства с биочипом на аналитический сигнал
Есикова Н. А., Буляница А. Л., Тараскин А. С., Евстрапов А. А. 293

Thermodynamic analysis of chemical processes in Ni/Cr/Si structure for growing carbon nanotubes by CVD
Il'in O. I. , Rudyk N N, Il'ina M V, Klimin V S, Fedotov A A..... 295

Оптимизация энергетической зависимости чувствительности счётчиков Гейгера-Мюллера для области энергий гамма-излучения от 0,05 до 3 МэВ
Ивашева А. Ю., Семенихин П. В. 296

Генерация реактивных напряжений в монокристаллах NiFeGaCo с эффектом памяти формы
Аверкин А. И., Тимашов Р. Б., Солдатов А. В., Крымов В. М., Николаев В. И. 298

Численное моделирование кремниевых обострительных диодов с «плавными» и «резкими» p-n-переходами
Иванов М. С., Родин П. Б., Подольская Н. И. 299

Влияние степени переохлаждения неупорядоченной системы на морфологию кристаллических структур
Яруллин Д. Т. 300

Новая конструкция волоконно-оптической линия связи для передачи СВЧ сигналов в X – диапазоне
Фадеенко В. Б., Давыдов В. В. 301

Компьютерное моделирование фемтосекундной лазерной абляции металлов
Давыдов Р. В., Антонов В. И. 303

Численное моделирование стационарных тепловых режимов солнечного элемента в концентраторном фотоэлектрическом модуле
Попов П. А., Поняев С. А., Шварц М. З. 305

Особенности передачи опорных и гетеродинных сигналов по волоконно-оптической линии связи в активной фазированной антенной решетке
Ленец В. А., Мороз А. В., Давыдов В. В. 307

Определение влияния упругих сферических нановключений на нелинейные модули упругости композитов
Семенов А. А., Бельтюков Я. М. 309

Сокращения в названиях организаций 311

Подписано в печать 12.10.2018. Формат 170х240. Печать цифровая.
Тираж 200. Заказ 41-12.

Отпечатано с готового оригинал-макета
ЛИТЕО

336