

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО,
ТЕРАГЕРЦОВОГО И ОПТИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ
МИКРО- И НАНОСТРУКТУРАМИ,
МЕТАМАТЕРИАЛАМИ И БИООБЪЕКТАМИ**

Посвящается 80-летию образования Саратовской области

Материалы Всероссийской научной школы-семинара

Под редакцией профессора *Д.А. Усанова*

Саратов 2016

УДК537.5
ББК 32.85+22.3

Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара/под ред. проф. Д. А. Усанова.– Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2016. – 152 с.: ил.

ISBN 978-5-91879-603-0

Приведены результаты научных исследований по современным проблемам взаимодействия электромагнитного излучения с полупроводниковыми микро-, наноструктурами, метаматериалами и биообъектами и применению соответствующих физических эффектов в современной полупроводниковой микро- и нанoeлектронике, в системах радиолокации, медицинской технике и устройствах неразрушающего контроля. Представлены новейшие разработки СВЧ-линий задержки, методов ближнеполевой сканирующей СВЧ-микроскопии, устройств на СВЧ фотонных кристаллах, измерителей наноперемещений, скоростей и ускорений.

Для специалистов и научных работников, занимающихся исследованиями в области твердотельной электроники, радиофизики, медицинской физики, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Редакционная коллегия:

Д.А. Усанов (отв. редактор), *Ал. В. Скрипаль* (отв. секретарь),
Б.Н. Рыгалин, В.Н. Посадский, В.С. Тяжлов

УДК 537.5
ББК 32.85+22.3

ISBN 978-5-91879-603-0

© Коллектив авторов, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
НАУЧНЫЕ И ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ШКОЛЫ ПО ФИЗИКЕ В САРАТОВЕ (К 80-ЛЕТИЮ ОБРАЗОВАНИЯ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ) <i>Д.А. Усанов, В.М. Аникин</i>	9
1. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА	13
МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ ПЛАЗМЫ <i>Р.К. Яфаров</i>	13
МОДИФИКАЦИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ γ - ОБЛУЧЕНИЕМ <i>Д.И. Биленко, О.Я.Белобровая, В.В.Галушка, И.В.Галушка, Э.А. Жаркова, И.Б. Мысенко, В.П. Полянская, В.И. Сидоров, Д.В. Терин, Е.И. Хасина, И.Т. Ягудин</i>	17
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОКОВУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ФОТОРЕЗИСТОРНЫХ ПЛАНАРНО-ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ <i>И.О. Кожевников, А.В. Митин, А.И. Михайлов</i>	20
ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ <i>Д.И. Биленко, О.Я.Белобровая, И.В.Галушка, Э.А. Жаркова, Д.О. Кочнев, И.Б. Мысенко, В.П. Полянская, Д.В. Терин, Е.И. Хасина</i>	23
ФАЗОСДВИГАЮЩЕЕ ЭКСПОНИРОВАНИЕ В ФОТОЛИТОГРАФИИ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ ЭРМИТА-ГАУССА НЕЧЕТНОГО ПОРЯДКА <i>А.С.Рудницкий, Н.Н.Полецук</i>	26
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ПРИ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ <i>Д.А. Усанов, Ан.В. Скрипаль, Е.И. Астахов, И.С. Костюченко</i>	28
ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОПЕРЕНОСА В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ – ОРГАНИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ» <i>В.О. Лукьянова, И.В. Маляр</i>	31
ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПЛЁНОК SnO ₂ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ <i>О.С.Махди, И.В.Маляр, И.В.Синёв, С.Б.Вениг, В.В.Кисин</i>	34

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ СТЕКЛОУГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕН-ГРАФЕНОВОЙ АТОМИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ <i>А. А. Зыктин, О. Е. Глухова</i>	36
ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ <i>И.О. Кожевников, Е.М. Ревзина, О.Ю. Кондратьева, Д.В. Терин</i>	38
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФЕН/ГРАФЕНОВЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР <i>О.Е. Глухова, Д.А. Мельников, М.М. Слепченков</i>	41
ВЛИЯНИЕ КОМПОЗИТНОГО НАНОРАЗМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА СТОЙКОСТЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА К ДЕЙСТВИЮ ИЗЛУЧЕНИЙ <i>С.В. Стецюра, П.Г. Харитонова, И.В. Маляр</i>	43
КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>И.А. Оносов, А.О. Пишкинас, С.А. Корчагин, С.П. Романчук, Е.М. Ревзина, Д.В. Терин</i>	46
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАФЕН-ФУЛЛЕРЕНОВОГО ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА В ЭЛЕКТРОНИКЕ <i>О.Е. Глухова, В.В. Митрофанов, М.М. Слепченков</i>	48
2. ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ	51
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ С ПЛАЗМЕННЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ <i>М.С. Усачёнок, Л.В. Симончик</i>	51
ДИСКРЕТНАЯ ДИФРАКЦИЯ В МАССИВЕ МАГНИТНЫХ ВОЛНОВОДОВ <i>А.А. Грачев, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин</i>	54
МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ <i>С.А. Корчагин, Д.В. Терин, О.Ю. Кондратьева, С.П. Романчук</i>	56
ВЛИЯНИЕ МЕТАСРЕДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕНН <i>В.И. Демидчик, Р.В. Корнев</i>	59
ФОТОННО - КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СВЕТОВОД В ОПТИЧЕСКОЙ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ <i>Б.А. Кузяков</i>	61
ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОН С ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ <i>А.С. Пластун, А.И. Конюхов</i>	64

ДИФРАКЦИЯ И ОТРАЖЕНИЕ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ ОТ ОБРЫВА ПЛАНАРНОГО ФЕРРИТОВОГО МИКРОВОЛНОВОДА <i>И.Е. Ревин, А.В. Садовников</i>	67
ФОКУСЫ ПО ОБЕ СТОРОНЫ ПЛОСКОЙ ЛИНЗЫ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ <i>В. Т. Ерофеенко</i>	69
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СТРУКТУРЕ СВЯЗАННЫХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ <i>М.А. Морозова, О.В. Матвеев</i>	71
3. МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ	73
МУЛЬТИЯДЕРНАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАРМПРЕПАРАТОВ <i>Ю.А. Пирогов</i>	73
ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ АГЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ МОЗГОВОГО КРОВОТОКА У НОВОРОЖДЕННЫХ МЫШЕЙ <i>Д.К. Тучина, П.А. Тимошина, А.С. Абдурашитов, М.М. Сагатова, Е.М. Зинченко, О.В. Семячкина-Глушкова, В.В. Тучин</i>	76
СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ ДЛЯ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА <i>С.Д. Стучебрюков, В.М. Сухов</i>	80
СИНТЕЗ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ (ОМК) ГИДРОКСИАПАТИТ (ГА)/МЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗА (МЦ) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЧ <i>Н.А. Захаров, Т.В. Захарова, М.А. Орлов</i>	82
ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СПЕКЛ-СТРУКТУР ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ <i>П.В. Павлов, А.Н. Малов</i>	85
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОАЛМАЗОВ С АЗОТИСТЫМИ ОСНОВАНИЯМИ ДНК: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СОЕДИНЕНИЙ <i>А.Н. Бокарев, И.Л. Пластун, Н.С. Зенкин</i>	89
ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БИОДЕГРАДАЦИИ МИКРОТРУБОК ХИТОЗАНА <i>Т.С. Бабичева, Н.О. Гегель, А.Б. Шиповская</i>	92
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР ГРАФЕН-ФОСФОЛИПИД <i>О.Е. Глухова, Г.В. Савостьянов, Д.С. Шмыгин</i>	95
ВЛИЯНИЕ МЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОЛОВНОГО МОЗГА <i>К.Е. Агандеева, И.Л. Пластун</i>	96

ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТКАНИ ПОЧЕК С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ <i>Н.М. Исаева, П.А. Питин, Т.И. Субботина</i>	99
ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ КРЫС В ОТДАЛЕННОМ ПЕРИОДЕ ПОСЛЕ ТЕХНОГЕННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ <i>Э. Б. Александрова</i>	101
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРЕСНОВОДНЫХ РАКООБРАЗНЫХ В РЯДУ ПОКОЛЕНИЙ <i>О.В. Воробьева</i>	104
ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА АКТИВНОСТЬ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА <i>Л.А. Кокорина, А.В. Неупокоева, Е.В. Симонова, А.Н.Малов</i>	107
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ ЛИПОПРОТЕИНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ <i>О.Е. Глухова, Г.В. Савостьянов</i>	110
ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ <i>Е.В. Горлова, А.А. Дорошенко, А.Э. Постельга, Д.А. Усанов</i>	112
BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS SA94 ASSOCIATED APPLE PLANT BACTERIUM AS A SOURCE OF POTENTIAL ANTIBIOTICS AND OTHER SECONDARY METABOLITES <i>Н.А. Mohamed, А.М. Peterson, W.E. Ebrahim</i>	115
4. ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА	118
ОБРАТИМЫЕ ОТКАЗЫ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ <i>А.М. Бобрешов, И.С. Коровченко, В.А. Степкин, Г.К. Усков, Лэ Куанг Тук</i>	118
КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ НАНОМЕТРОВАЯ МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЛЕНКА – ДИЭЛЕКТРИК МЕТОДОМ ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА <i>Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, Е.В. Латышева</i>	121
ПОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ <i>А. М. Бобрешов, С. Е. Нескородов, Г. К. Усков</i>	124
АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА АВТОДИННОГО ДАТЧИКА ДЛЯ СЛУЧАЯ ОДНОВРЕМЕННО ВИБРИРУЮЩЕГО И ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ ТОЧЕЧНОГО ОБЪЕКТА <i>К.А. Игнатков</i>	127

УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГИБРИДНЫХ ВОЛН В МУЛЬТИФЕРРОИДНОЙ СТРУКТУРЕ <i>К.В. Бубликов, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, Ю.П. Шараевский</i>	130
РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЕТКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В ДИАПАЗОНЕ 2.4 – 2.483 ГГц ДЛЯ АНТИКОЛЛИЗИОННЫХ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ <i>С.Г. Сучков, А.А. Пиловец, С.В. Комков, С.С. Янкин, В.А. Николаевцев, Ю.А. Шатрова</i>	131
5. ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	134
О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СВЕХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ВАКУУМНОГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОФОТОДИОДА С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМ УГЛЕРОДНЫМ ЭМИТТЕРОМ <i>Г.Г. Акчурин, А.Н. Якунин, Н.П. Абаньшин, Ге.Г. Акчурин</i>	134
ПЛАЗМОННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ХРАПОВИКА В НЕОДНОРОДНОМ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ГРАФЕНЕ <i>К.В. Машинский, Д.В. Фатеев, В.В. Попов</i>	137
ПОЛОСНОПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР И КОМПОЗИТНОГО НАНОМАТЕРИАЛА <i>С.Ю. Молчанов, Н.М. Ушаков, С.А. Алавердян, В.П. Мещанов</i>	140
ИКСПЕКТРОСКОПИЯ ЗАМЕЩЕННЫХ β -D-ГЛЮКОЗЫ <i>Л. М. Бабков, И. В. Ивлиева, М. В. Королевич, Е.А. Моисейкина, О.А.Плеханова</i>	144
ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ЭНДОЭДРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА $A^+@C_{60}$ <i>О.Е. Глухова, М.М. Слепченков, В.В. Шунаев</i>	147
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ БИООБЪЕКТОВ В X-ДИАПАЗОНЕ <i>М.К. Мерданов, М.Д. Алехин, А.П. Зарецкий</i>	149

ВВЕДЕНИЕ

Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысоко-частотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» посвящена 80-летию образования Саратовской области.

В лекциях школы-семинара представлены результаты перспективных исследований по тематике конференции, приведены и продемонстрированы образцы новейших приборов и устройств. Особенностью школы будет участие в ней руководителей предприятий и главных конструкторов, разрабатывающих приборы по направлению школы-семинара. В 2016 году 125 участниками представлено 50 докладов из 10 городов России и других стран.

Известные специалисты в области полупроводниковой, СВЧ, микро-, нано- и оптоэлектроники представили молодых ученых, аспирантов и лекций для студентов по современным проблемам взаимодействия электромагнитного излучения с полупроводниковыми микро-, наноструктурами, метаматериалами и биообъектами, и применению соответствующих физических эффектов в современной полупроводниковой микро- и наноэлектронике, в системах радиолокации, медицинской технике и устройствах неразрушающего контроля.

НАУЧНЫЕ И ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ШКОЛЫ ПО ФИЗИКЕ В САРАТОВЕ (К 80-ЛЕТИЮ ОБРАЗОВАНИЯ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ)

Д.А. Усанов, В.М. Аникин

ФГБОУ ВО "Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского"

E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Значительный объем в высокотехнологичной промышленности в Саратовской области составляла в недалеком прошлом и составляет в настоящее время продукция предприятий электронной промышленности. При этом в последние годы наметилась тенденция к увеличению объема этого типа производства. Саратов относится к центрам, накопившим (в основном за период после Великой Отечественной войны) большой опыт научных исследований, освоения технологий производства изделий электронной техники, доведения их до серийного производства, подготовки кадров для этого направления науки и техники.

На формирование в Саратове школы радиоэлектроники значительное влияние оказал корифей отечественной физики П.Н. Лебедев, рекомендовавший на должность профессора Саратовского университета своего ученика В.Д. Зёрнова [1], ставшего первым заведующим кафедрой физики, первым деканом физико-математического факультета, ректором университета. Вместе с В.Д. Зёрновым в Саратов приехали другие представители физической школы П.Н. Лебедева, в частности К.А. Леонтьев [2]. С приходом в СГУ московских физиков в университете стали развиваться радиофизика, теоретическая физика, оптика, физика полупроводников, вакуумная и твердотельная электроника, радиотехника.

Большое влияние на развитие физического направления в науке и образовании в Саратове оказала и ленинградская школа физиков. В 1935 году на должности исполняющих обязанности доцентов СГУ были приняты В.П. Жузе и Е.Ф. Гросс [3,4] в связи с их высылкой в административном порядке из Ленинграда в Саратов. В.П. Жузе – один из ближайших сотрудников академика А.Ф. Иоффе вошел в историю физики полупроводников в связи с выполненными им совместно с Б.В. Курчатовым (братом академика И.В.Курчатова) исследованиями влияния примесей на ход температурной зависимости электропроводности полупроводников. Результат этих исследований Ж.И. Алферов в своей нобелевской лекции выделил в качестве наиболее значительных систематических исследований в физике полупроводников [5]. В 1936/37 учебном году В.П.Жузе впервые в СГУ подготовил и прочитал курс лекций по физике полу-

проводников. Он организовал в СГУ научную группу, в которую вошла ассистент З.И.Кирьяшкина, в последующем многие годы руководившая кафедрой физики твердого тела. По ее инициативе впервые в СССР были разработаны программы курсов, по которым многие годы проводилась подготовка специалистов, обучающихся в университетах по специальности «Физика полупроводников и диэлектриков» (1979).

В 1941 году под руководством В.П. Жузе в СГУ была создана научная лаборатория полупроводников. Имя В.П.Жузе вошло в историю физики полупроводников также в связи с обнаружением квазичастицы, названной экситоном – связанного состояния электрона и дырки в полупроводниках. Эксперименты В.П. Жузе и С.М. Рывкина по исследованию кинетики фотопроводимости в полупроводниках привлекли внимание Е.Ф. Гросса. Им и его аспирантом М.А. Каррыевым было впервые получено прямое экспериментальное доказательство существования экситонов [6].

В современной наноэлектронике экситоны играют важную роль не только для объяснения оптических явлений, но и как «работающие» в реальных устройствах квазичастицы. Новые полупроводниковые лазеры, основанные на структурах нанометровых размеров, не функционировали без использования экситонов. В СГУ Е.Ф.Гроссу было поручено проведение курса «спектроскопии» (40 лекций и 40 семинаров). Работая в СГУ, Е.Ф.Гросс решением ВАК в 1936 г. был утвержден в ученой степени доктора физико-математических наук.

На формирование научной и педагогической школ физиков СГУ большое влияние оказал С.Э. Фриш, работавший в годы войны в СГУ вместе с коллективом Ленинградского государственного университета, эвакуированного в Саратов. Им, совместно с сотрудниками СГУ П.В. Голубковым, З.И.Кирьяшкиной и В.В.Игоным в годы Великой отечественной войны было выполнено исследование, имевшее практическое значение в интересах обороны страны. Многие годы студенты СССР изучали курс физики в вузах по учебникам, написанным С.Э.Фришем и А.В.Тиморевой [7].

Саратов был и остается крупным центром химической промышленности. На формирование научной школы в Саратове на стыке физических и химических наук оказал значительное влияние лауреат Нобелевской премии наш земляк, академик Н.Н.Семенов. С 1930-х годов Н.Н. Семенов поддерживал творческие связи с физическим факультетом СГУ, с будущим основателем первой в стране кафедры химической физики А.Д. Степуховичем. Сотрудники СГУ регулярно проходили стажировку в возглавлявшемся Н.Н. Семеновым Институте химической физики АН СССР [8].

Развитие научных исследований в Саратове в области радиоэлектроники многие годы связано с именем академика Ю.В. Гуляева, руководителя научного центра РАН. Ю.В.Гуляев был научным руководителем ряда диссертаций саратовских ученых по актуальным проблемам радиоэлектроники, научным консультантом докторских диссертаций, оппонентом докторских и кандидатских диссертаций. Его ближайший сотрудник член-корреспондент РАН

С.А. Никитов на протяжении ряда последних лет руководит научными исследованиями физиков СГУ по новому направлению в области радиоэлектроники – физике фотонных кристаллов.

Авторами учебников, по которым многие годы обучались студенты вузов страны по профилю радиофизики и электроники были профессора Саратовского университета В.И.Калинин и Г.М. Герштейн [9], В.Н. Шевчик [10].

М.Л.Кацем, М.А.Ковнером и Н.К.Сидоровым была опубликована одна из первых в СССР работа по физике лазеров [11].

По результатам оригинальных научных исследований научных школ, руководимых Д.И. Трубецковым, В.С.Анищенко, С.П. Кузнецовым и Б.П. Безручко, в области нелинейной динамики изданы учебные пособия для студентов вузов, получившие признание научной и педагогической общественности [12–16]. В рамках научной школы профессора В.В. Тучина успешно развиваются исследования в области оптики и биофотоники биологических тканей, по материалам которых изданы учебные пособия для студентов вузов, специализирующихся по медицинской диагностике [17–18].

Не случайно руководителями крупных саратовских предприятий радиоэлектронного профиля в разные годы были и работают в настоящее время выпускники СГУ О.М. Радюк, Н.А. Бушуев, С.Ф. Нахов, Э.А. Семенов, В.Н. Посадский, В.В. Муллин, В.Д. Тупикин, А.В. Никонов, Е.П. Мурашев и др.

Большая группа выпускников университета удостоена почетного звания лауреата Государственной премии СССР и РФ в области науки и техники. В их числе работники саратовских промышленных предприятий О.М. Радюк, В.К. Семенов, Э.А. Семенов, В.Н. Посадский, Л.И. Хильченко, В.Д. Тупикин, В.П. Мещанов, В.Т. Васильев, Н.И. Сеницын, В.Г. Тугарин, Б. М. Кац и др.

Новое время ставит перед коллективом университета задачи в области подготовки кадров для промышленности, способных эффективно трудиться в условиях рыночной экономики, обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции высокотехнологичной промышленности. Успешное решение этих задач во многом определяется эффективностью взаимодействия коллективов университета и предприятий промышленности. Можно выразить уверенность в том, что движение в этом направлении будет способствовать повышению актуальности проводимых исследований, практической значимости задач, решаемых учеными и инженерами, повышению качества подготовки выпускников по инженерным специальностям.

Библиографический список

1. *Аникин В.М.* Фабрика молодых физиков. П.Н. Лебедева и Саратовский университет // УФН. 2016. Т. 186. № 2. С. 169–173.
2. *Голубков П.В.* Константин Александрович Леонтьев // Известия Саратовского университета. Новая сер. Сер. Физика. 2014. Т.14. Вып. 1. С.65–68: Статья П.В. Голубкова из УФН (1932. Т. 12. С. 501–505) с комментариями В.М. Аникина.

3. *Усанов Д.А.* К 100-летию профессора Владимира Пантелеймоновича Жузе // Известия Саратовского университета. Новая сер. Т. 5. Сер. Физика, 2005. Вып.1.
4. *Усанов Д.А.* К 60-летию кафедры физики твердого тела // Известия Саратовского университета. Новая сер. Сер. Физика. 2006. Т.6, Вып.1/2. С. 85–90.
5. *Алферов Ж.И.* Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии. (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2000 г.) // УФН. 2002. №9. С. 1068–1086.
6. *Гросс Е.Ф., Каррыев Н.А.* Поглощение света кристаллом закиси меди в инфракрасной и видимой части спектра // ДАН СССР. 1952. Т.84, № 2. С. 261–264.
7. *Фриш С.Э., Тиморева А.В.* Курс общей физики. В 3 томах. 12-е изд. - СПб : Лань, 2007.
8. *Аникин В.М., Усанов Д.А.* Николай Николаевич Семенов: волжские сюжеты жизни // Наука и технологии в промышленности. 2016. № 1. С. 122–127.
9. *Калинин В. И., Герштейн Г. М.* Введение в радиофизику / под ред. В.И. Калинина. - М.: Гостехиздат, 1957. 660 с.
10. *Шевчик В.Н.* Основы электроники сверхвысоких частот. - М.: Советское радио, 1959. 307 с.
11. *Кац М.Л., Ковнер М.А., Сидоров Н.К.* Оптические квантовые генераторы (лазеры).- Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1964. 352 с.
12. *Рабинович М. И., Трубецков Д. И.* Введение в теорию колебаний и волн. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1992. 456 с.
13. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. 2003-2004. Т. 1. 495 с. Т. 2. 646 с.
14. *Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е.* Лекции по нелинейной динамике. М. : Ижевск: Изд-во «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. 500 с.
15. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос и гиперболические аттракторы: от математики к физике. М. : Ижевск: ИКИ, 2013. 488 с.
16. *Безручко Б.П., Смирнов Д.А.* Математическое моделирование и хаотические временные ряды.- Саратов: ГосУНЦ "Колледж", 2005. 320 с.
17. *Тучин В.В.* Оптическая биомедицинская диагностика: Учебное пособие с грифом Минобразования РФ. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. Т. 1. 560 с. Т. 2. 368 с.
18. *Tuchin V.V.* Light Scattering Applications in Medical Diagnostics.- Bellingham, WA: SPIE Press, 2015. 882 p.

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ ПЛАЗМЫ

Р.К. Яфаров

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: pirpc@yandex.ru

Исследовано влияние низкоэнергетичной плазменной обработки кристаллической поверхности в различных газах на электронные свойства гетероструктур «туннельно-тонкая пленка на кремнии». Электронные свойства вблизи поверхности кристаллических полупроводников сильно отличаются от электронных свойств в объеме. Дополнительные модификации вносит реконструкция поверхности. Модификации касаются перераспределения плотности заряда в приповерхностной области и появления, помимо собственных поверхностных состояний, обусловленных прерыванием периодичности кристаллической решетки полупроводника, других, несобственных поверхностных состояний. Последние обусловлены возмущениями потенциала идеальной поверхности, локализуются вблизи дефектов их порождающих и связаны, прежде всего, с используемыми методами поверхностной обработки. Такая модификация поверхностей проявляется прежде всего в ослаблении явлений, связанных с использованием эффектов поля, люминесценции, фото- и поверхностной проводимости, в изменении работы выхода и др. [1,2]. Однако, с другой стороны, это может позволить в определенной степени активно формировать электронные свойства поверхности обрабатываемых полупроводниковых кристаллов.

Присутствие электронных поверхностных состояний на поверхности полупроводника возмущает электронную структуру в объеме и делает ее энергетически невыгодной. Поэтому поверхностные атомы кремния, например, р-типа, имеющие ненасыщенную химическую связь, действуют как дырочные ловушки, заряжаясь положительно при отдаче электрона в валентную зону по-

лупроводника. Такие поверхностные состояния являются донорными. Это приводит к образованию на поверхности трехвалентного кремния с положительным зарядом.

Неоднородное распределение заряда приводит к возникновению электростатического встроенного потенциала, с электрическим полем, направленным в объем полупроводника. Ширина области пространственного заряда и сопротивление обедненного слоя тем больше, чем больше пространственный заряд, который в случае свободной поверхности и отсутствии внешних полей равен и противоположен по знаку заряду в поверхностных состояниях.

В случае прямого подключения гетероструктуры на кремнии р-типа к источнику питания внутреннее поле, вызванное присутствием поверхностных зарядов, будет направлено противоположно внешнему электрическому полю, что приводит к ослаблению последнего. Поэтому ток через структуру при изменении внешнего напряжения возникает только после того, как напряженность от внешнего поля превысит, напряженность поля от встроенного заряда.

Эксперименты проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника, описанного в работе [3]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля, соответствующая возникновению в зоне газового разряда электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), составляли соответственно 250 Вт и 875Gs. Давление рабочих газов в процессах обработки было равным 0.1Па и обеспечивало выполнение условий ЭЦР, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5% [4].

В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния кристаллографической ориентации (100) р-типа, поверхность которых модифицировалась под воздействием низкоэнергетичной СВЧ плазменной микрообработки в различных газовых средах.

В качестве рабочих газов для получения атомно-чистой поверхности пластин монокристаллического кремния (100) р-типа, пассивированных тонкой пленкой естественного окисла, использовались хладон-14, аргон и водород. Величины ускоряющих напряжений на подложкодержателе в процессах плазменного травления кремния были фиксированными и составляли –100 В. В соответствии с природой используемого рабочего газа обработка кремниевых пластин с естественным окислом осуществляется в режимах ионно-плазменного травления в случае использования аргона или реактивного ионно-плазменного травления в случае использования хладона-14 или водорода. Распыленные поверхностные атомы кремния при ионно-плазменном травлении и образующиеся летучие кремнийсодержащие продукты реакций в случае реактивного ионно-плазменного травления откачиваются вакуумной системой.

При использовании низкоэнергетичной плазмы аргона травление пластин кремния с естественным оксидным покрытием осуществляется за счет распыления атомов кремния и частиц его естественного окисла ускоренными ионами. В связи с инертностью аргона, какие-либо химические связи с поверхностными атомами кремния не образуются. В результате такой обработки поверхность кремния приобретает структуру и плотность оборванных (ненасыщенных) свя-

зей, характерных для атомно-чистой поверхности кремния заданной кристаллографической ориентации [1].

В процессе травления в плазме CF_4 при отрицательных смещениях на поверхности кремния образуются также атомы углерода, которые на начальных стадиях процесса способствуют восстановлению и удалению в виде CO естественного окисла на кремнии. После удаления оксида кремния атомы углерода за счет поверхностной миграции и хемосорбции образуют адкомплексы Si-C , которые имеют сильную энергию химической связи (4.55 эВ) и препятствуют процессу травления, замедляя его скорость [4,5]. Таким образом, в результате плазмохимической микрообработки кремния с естественным оксидным покрытием в среде хладона-14 на его очищенной от окислов поверхности образуются хемосорбированные комплексы SiC и SiF , которые пассивируют оборванные (ненасыщенные) химические связи поверхностных атомов кремния (рис.1).

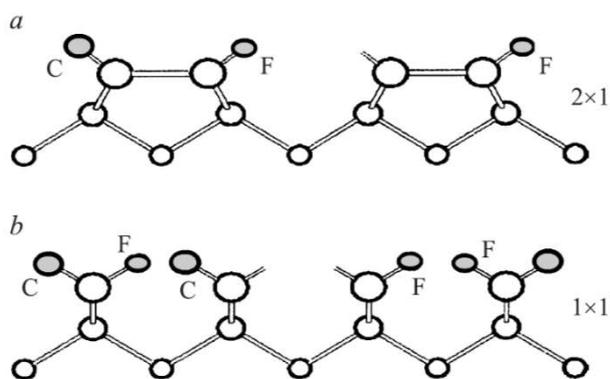


Рис.1. Схема расположения хемосорбированных атомов углерода и фтора на поверхностях $\text{Si}(100)$ после плазменной обработки в хладоне: а — после димерной реконструкции $\text{Si}(100)2 \times 1$; б — идеальной нереконструированной $\text{Si}(100)1 \times 1$ [1]

После плазменной очистки пластин кремния в одном вакуумной технологическом цикле осуществлялось осаждение в СВЧ плазме смеси паров этанола и моносилана пленочных структур аморфного гидрогенизированного карбида кремния (a-SiC:H) толщиной 10 нм. Затем на поверхность гетероструктуры методом вакуумного термического осаждения наносились металлические контакты.

В структурах исследовался поперечный электронный транспорт с прямой полярностью подключения к источнику питания. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) производились с использованием универсального мультиметра Keithley 2000. ВАХ измерялись при изменении внешнего напряжения в интервале от 0 до 10 В в прямом и обратном направлениях.

На рис. 2 приведены в логарифмических координатах ВАХ поперечного электронного транспорта в пленочных структурах a-SiC:H , полученных в одинаковых режимах осаждения на кристаллах кремния (100) после их травления в различных плазмообразующих газовых средах.

Наблюдается закономерность: при изменении напряжения в одном и том же интервале значений максимальные токи через гетероструктуру "кремний–туннельно-тонкая пленка a-SiC:H" увеличиваются на порядки величин в ряду аргон–водород–хладон, а значения напряжений, при которых наблюдаются начала роста токов, напротив, уменьшаются от примерно 10 В при травлении естественного оксидного покрытия кремния в плазме аргона, 1.3–1.4 В — при травлении в плазме водорода и 0.1 В — при травлении в плазме CF₄. Причем участки начала роста токов после обработки в аргоне и водороде носят характер резкого (практически скачкообразного) переключения. Перепад токов при этом составляет для плазменной обработки в аргоне 4 порядка, для обработки в плазме водорода свыше 5 порядков, а при обработке в плазме CF₄ — около девяти порядков от начального уровня. Плотности токов в последнем случае достигали значений 15 А/см² [6]. При изменении напряжения в обратном направлении токи через структуры во всех случаях выше, чем в прямом.

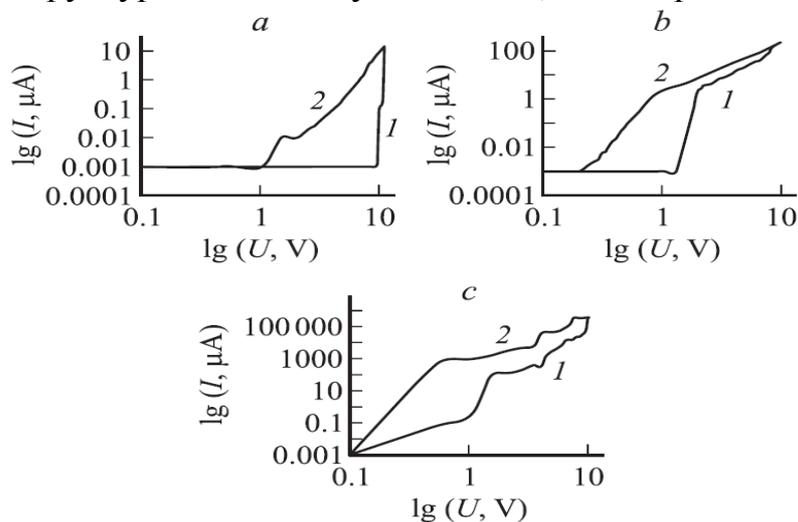


Рис. 2. ВАХ поперечного транспорта электронов в пленочных структурах a-SiH:H на кремнии (100) p-типа, полученных при прямом (1) и обратном (2) изменении напряжения после обработки кремния в СВЧ плазме различных газовых сред: а) аргон, б) водород, с) хладон

Установленные особенности переноса носителей в кристаллических полупроводниковых структурах с встроенным электростатическим потенциалом делают их привлекательными для использования в качестве преобразователей в устройствах силовой электроники (пускателей, предохранителей и др.), по сравнению с обычными полупроводниковыми преобразователями на основе p-n переходов. В частности, можно отметить, что напряжение отсечки для кремниевых структур с встроенным потенциалом и туннельно тонким слоем карбида кремния может изменяться от 1 до 5-6 В и выше. Это позволяет использовать их в качестве ограничителей напряжения, встроенных в структуры интегральных микросхем. Кроме того, на основе данных гетероструктур могут создаваться автоэмиссионные источники электронов для вакуумных приборов, та-

ких как катодолюминесцентные плоские дисплеи, высокоэффективные источники белого света, автоэмиссионные переключатели и др.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10033).

Библиографический список

1. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности.-М.:Наука, 2006. 490 с.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. Физика полупроводников. - М.: Наука, 1977. 672 с.
3. Шаныгин В.Я., Яфаров Р.К. Получение атомарно-чистых поверхностей кремния в низкоэнергетичной СВЧ-плазме низкого давления. / ЖТФ. 2009. Т.79, В.12. С.73-78.
4. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий.- М.: Физматлит, 2009. 216 с.
5. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. -М.: Мир, 1986. 404 с.
6. Будко Д.В., Яфаров Р.К. Тез.докл. VI Всеросс. конф. молодых ученых "Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика". Саратов. 13–15 сентября 2011. с. 13.

МОДИФИКАЦИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ γ - ОБЛУЧЕНИЕМ

Д.И. Биленко, О.Я. Белобровая, В.В. Галушка, И.В. Галушка, Э.А. Жаркова, И.Б. Мысенко, В.П. Полянская, В.И. Сидоров, Д.В. Терин, Е.И. Хасина, И.Т. Ягудин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: lab32@mail.ru

Модификация пористого кремния γ - облучением представляет интерес с точки зрения возможного управления люминесценцией в видимой области. В качестве подложек для получения пористого кремния (ПК) использовались радиационно обработанные образцы кремния различного уровня легирования γ – квантами радиоизотопного источника ^{226}Ra и на пучке тормозного излучения бетатрона СГУ. ПК получался при анодной электрохимической обработке предварительно подготовленной подложки в электролите на основе плавиковой кислоты HF. Состав электролита: 48% раствор плавиковой кислоты, этиловый спирт ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$) в соотношении 1:1. Электрохимическая обработка проводилась в гальваностатическом режиме при постоянном токе [1]. Образцы пористого кремния (ПК) получались при режиме тока от 8 до 50 мА. Толщина полученных образцов варьировалась от 2 до 150 мкм и пористость от 45 до 85%. В процессе формирования ПК измерялись интерферограммы, позволяющие получать временные зависимости толщин и пористости исследуемых структур.

Полученные образцы пористого кремния были разделены на две группы: группа А – ПК на модифицированной (облученной) подложке; группа В – об-

лученный слой ПК. Для сравнения исходным считался образец ПК без модификации подложки и облучения слоя.

Спектры фотолюминесценции регистрировали на люминесцентном спектрофотометре LS55 PerkinElmer при комнатной температуре. Параметры регистрации спектров испускания следующие: диапазон длин волн 200–900 нм, диапазон длин волн возбуждения варьировался от 250 до 400 нм, диапазон напряжений 790В, скорость сканирования 7 нм/с. Возбуждение осуществлялось линией лазера, соответствующей длине волны 550 нм. Использовалась геометрия скрещенных поляризаторов.

Спектры пропускания регистрировались на быстродействующем Фурье спектрофотометре FTIR – 840051 Shimadzu в диапазоне частот 350 до 7800 см^{-1} с разрешением 0,5 см^{-1} .

Спектры ФЛ представляли собой широкие полосы, для исходного образца ПК (125 ПК) полуширина полосы ν составляла 212 нм, тогда как у образцов ПК группы А полуширина спектра существенно уменьшалась в зависимости от дозы. При облучении γ – квантами радиоизотопного источника ^{226}Ra дозой 38кР ν составляла 57 нм, тогда как на пучке тормозного излучения с дозой 38.4кР $\nu=98$ нм. Люминесценция отличалась большой интенсивностью и была видна невооруженным глазом. Для образцов группы А положение максимума фотолюминесценции λ_{max} по отношению к λ_{max} исходного ПК незначительно сдвигалось в коротковолновую область. Согласно нашим оценкам энергий квантования электронов и дырок наблюдавшиеся энергии максимумов ФЛ от 1.9 до 2 эВ соответствуют размерам кристаллитов L от 10 до 3 нм, тогда как для исходного ПК $E_g=1.8$ эВ и $L=12$ нм.

Наличие в спектрах ФЛ вклада нанокристаллов может быть связано с уменьшением скорости поверхностной рекомбинации, что дает люминесценцию самых малых кристаллитов. Этот факт подтверждается появлением левого плеча в спектрах ФЛ образцов группы А. Относительное сопоставления интенсивностей в максимуме спектра ФЛ при одной поляризации света обнаружило увеличение сигнала для этих образцов по сравнению с исходным ПК. Это может быть связано с усилением сигнала, являющегося суммой сигналов от стенок и дна пор, либо уменьшением коэффициента поглощения ПК за счет уменьшения плотности материала.

Наличие широкой люминесцентной полосы являются подтверждением квантово размерного эффекта. Полуширина линии колеблется от 212 до 74 нм. При облучении ПК λ_{max} сдвигается в коротковолновую область от 657 нм для исходного ПК (1.88эВ) до 623 нм (2 эВ) при 20 кР. Облучение может сопровождаться изменением формы и размера пор. Вполне вероятен окислительный процесс ПК, который с одной стороны сенсibiliзирует поверхность, с другой уменьшает размер нанокристаллита. Возможный рост числа излучательных переходов за счёт насыщения оборванных связей кислородом может являться причиной роста интенсивности в точке λ_{max} .

Наблюдавшиеся в ИК спектрах полосы поглощения и их идентификация по литературным данным [3] представлены на рис. 1. Для всех исследуемых об-

разцов характерна основная линия окисленного кремния (Si–O–Si), которая находится в диапазоне от 1000 до 1200 см^{-1} . Пик у обеих подложек (облученной и необлученной) находится на 1111 см^{-1} . Для исходного 125ПК, 1.2ПК и 2.3ПК этот характерный пик сдвигается в низкочастотную область и растет. Такой рост интенсивности связан с заполнением свободных связей кремния группами OH в ПК. Наибольший рост наблюдается в исходном 125ПК. В 2.3ПК интенсивность падает практически в полтора раза и в 2,5 раза - в 1.2ПК. Пик на 609 см^{-1} характерен для подложек кремния облученных и необлученных. Данный пик выражает связь (Si–Si), у обоих пористых образцов этот пик деформируется и сдвигается в высокочастотную область 625 см^{-1} (Si–H деформационные). Вероятно, что это связано с образованием ПК. Пик, отвечающий за колебания связей Si–H, находится на частоте 895 см^{-1} . Он характерен для обеих подложек и 1.2 ПК.

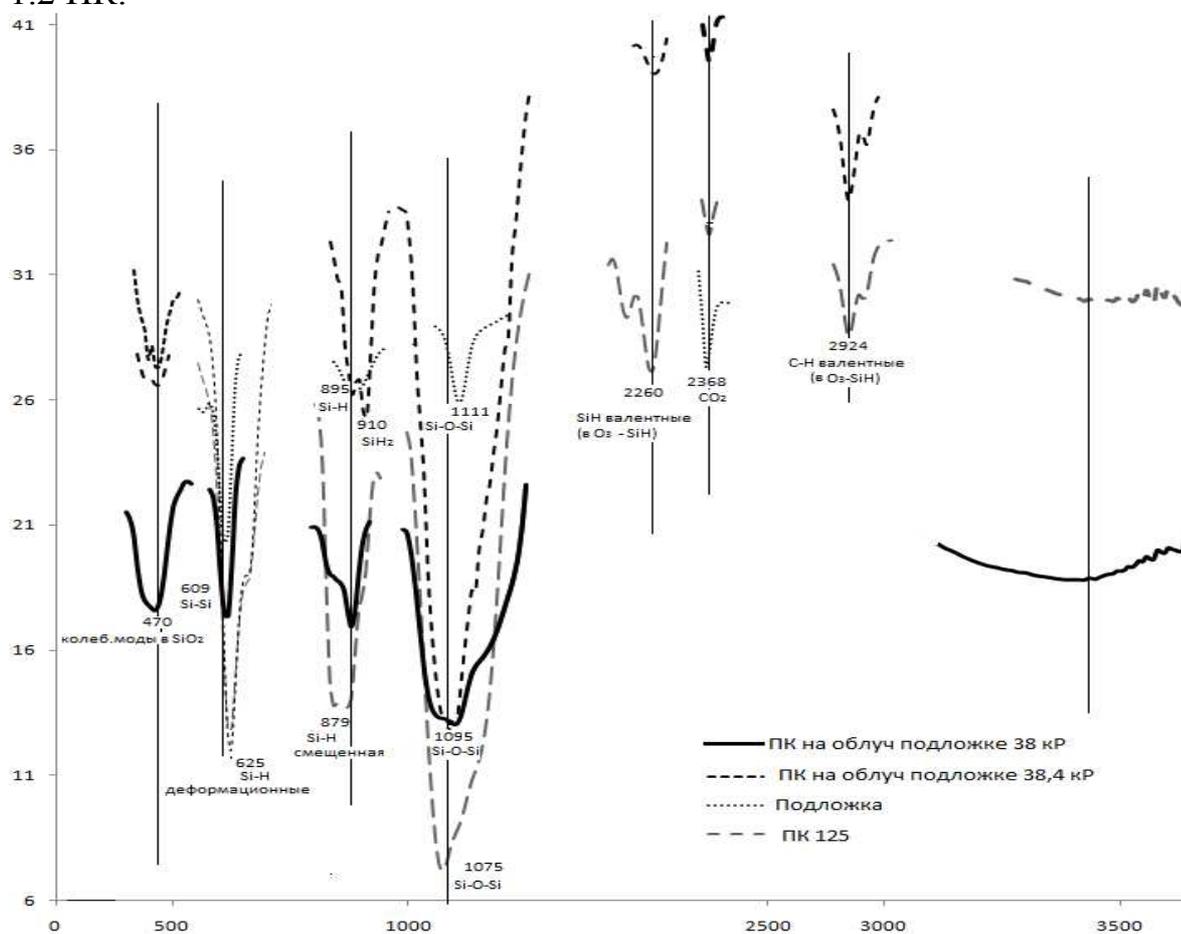


Рис. 1. Спектры пропускания образцов группы А

Для 2.3ПК этот пик сдвигается вправо и равен 910 см^{-1} , что соответствует ножничным колебаниям SiH₂. Кроме того, в образцах 125ПК и 2.3 ПК появляются пики на 2260 и 2924 см^{-1} , которые отвечают за валентные колебания SiH (в O₃-SiH) и C–H (в CH₂), соответственно.

Данная работа выполнена в рамках базовой части государственного задания министерства образования и науки Российской Федерации. Проект

№3468: Фазовая и структурная модификация микро- и наноструктур электромагнитным излучением широкого диапазона энергий.

Библиографический список

1. Решина И.И. Гук Е.Г. Комбинационное рассеяние и люминесценция пористого кремния // ФТП. 1993. Т.7, В.5. С 728-735.
2. Биленко Д.И., Белобровая О.Я., Жаркова Э.А., Терин Д.В., Хасина Е.И. Влияние давления атмосферного воздуха на токоперенос в структурах с окисленным пористым кремние / ФТП. 2007. Т. 8. С.945-949.
3. Леньшин А.С. Кашкаров В.М., Середин П.В., Спивак Ю.М., Мошников В.А. Исследование электронного строения и химического состава пористого кремния, полученного на подложках n- и p- типа, методами XANES и ИК спектроскопии //ФТП. 2011. С.1231-1233.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОКОВУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ФОТОРЕЗИСТОРНЫХ ПЛАНАРНО-ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

И.О. Кожевников, А.В. Митин, А.И. Михайлов
Саратовский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: kozhevnikov_io@mail.ru

Хорошо известно, что полуизолирующий арсенид галлия является материалом, в котором наблюдаются магниторезистивный эффект и эффект Холла – возникновение поперечного электрического поля в образце с током при помещении его в магнитное поле [1,2]. Кроме того, арсенид галлия известен как материал с высокой подвижностью электронов, в котором наблюдается эффект Ганна вследствие междолинного переноса носителей заряда, сопровождающийся токовыми колебаниями СВЧ, а также менее известная рекомбинационная неустойчивость тока, связанная с захватом электронов глубокими примесными центрами в сильных электрических полях в компенсированном материале [3]. Все это делает данный полупроводниковый материал перспективным для функциональной электроники.

В работах [4-6] было установлено, что в мезапланарных резисторных структурах на основе высокоомного арсенида галлия при значении приложенного напряжения, соответствующем участку ОДП на N-образной вольт-амперной характеристике, возможно формирование динамической неустойчивости тока и соответствующих токовых колебаний во внешней электрической цепи вследствие захвата электронов глубокими центрами, которыми в подложках исходных эпитаксиальных пластин марки САГ-2БК могут служить компенсирующие примеси меди и хрома. При этом воздействие засветки полуизоли-

рующего GaAs в межконтактной области приводит к линейному росту частоты токовых колебаний. В [6] показано, что характер зависимости частоты колебаний повторяет характер зависимости среднего тока через структуру от мощности лазерного излучения (680 нм) в исследуем диапазоне.

В данной работе исследовалось влияние магнитного поля на частоту токовых автоколебаний, возникающих в аналогичных исследуемым в [4-6] высокоомных планарных структурах *n*-GaAs с встречно-заостренной формой контактных площадок и межконтактным расстоянием 60 мкм. В качестве источника магнитного поля использовался постоянный магнит. Величина магнитной индукции градуировалась по расстоянию до плоскости магнита с помощью датчика Холла ДХК-0,5А ($\gamma = 280$ мВ/Тл).

На рисунке 1 представлены экспериментальные зависимости частоты токовых колебаний и среднего тока через структуру от величины магнитной индукции при изменении приложенного к структуре напряжения. Как видно из представленных зависимостей, с увеличением индукции магнитного поля частота токовых колебаний в структуре возрастает, а средний ток через структуру спадает по нелинейному закону. При этом увеличение приложенного напряжения приводит к снижению частоты и коэффициента частотной модуляции, что согласуется с результатами, полученными при исследовании фоточувствительности аналогичных структур [5,6]. Спад тока на полученной зависимости может быть объяснен уменьшением проводимости вдоль направления протекания тока вследствие возникающего магниторезистивного эффекта [7].

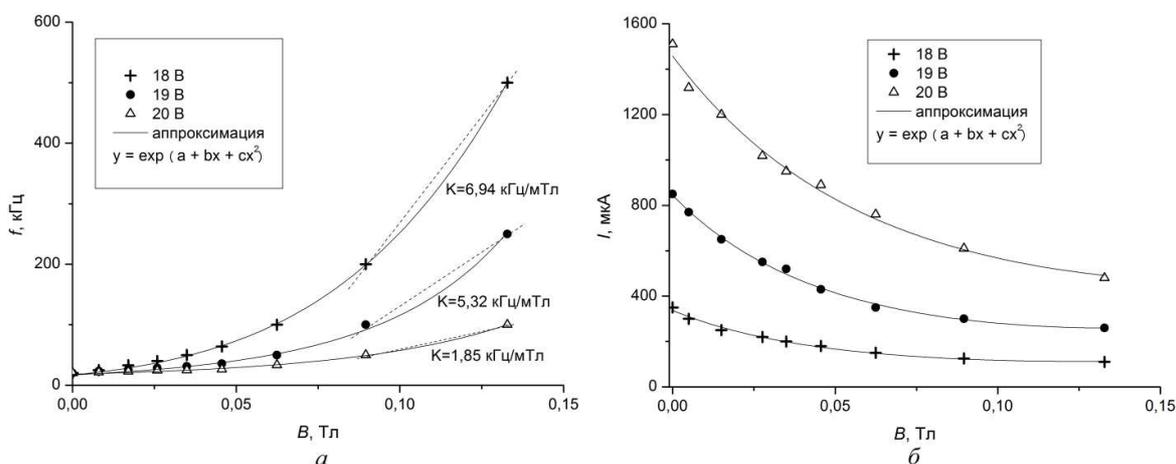


Рис. 1. Семейство характеристик зависимости а) частоты токовых колебаний, и б) среднего тока через структуру от величины магнитной индукции; пунктирной линией обозначена линейная аппроксимация для расчета коэффициента частотной модуляции K

Для оценки связи частоты токовых колебаний и среднего тока через структуру построены корреляционные зависимости, представленные на рисунке 3. Из данных зависимостей следует, что частота токовых колебаний и сред-

ний ток через структуру связаны не линейным законом, а экспоненциальным, вида $f(I) = \exp\left(\frac{a+b}{I+c}\right)$.

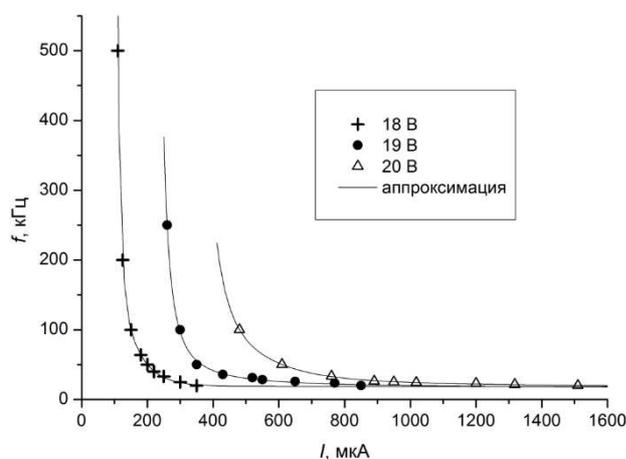


Рис. 3. Корреляция экспериментальных данных частоты токовых колебаний и среднего тока через структуру

Таким образом, в ходе проведенного исследования установлено, что при помещении фоточувствительных планарно-эпитаксиальных резисторных мезоструктур на основе высокоомного арсенида галлия *n*-типа с характерным участком ОДП на N-образной вольт-амперной характеристике в магнитное поле постоянного магнита происходит возрастание частоты автоколебаний во внешней электрической цепи, связанное с возникающим в полупроводнике магнито-резистивным эффектом. Полученные результаты имеют практическое значение, поскольку открывают перспективы реализации нового прибора функциональной электроники – генератора токовых колебаний с возможностью бесконтактного управления как с помощью оптического воздействия, так и с помощью магнитного поля, как это было показано в обзоре работ, посвященных магнито-чувствительным транзисторам [7]. В связи с этим, для установления физических основ наблюдаемого эффекта возрастания частоты токовых колебаний при помещении образца в магнитное поле необходимо проведение дополнительных исследований. В частности, необходимо исключить возможную неоднородность магнитного поля, для чего планируется помещать образец в зазор между двумя сердечниками одинаковых электромагнитов, либо систему катушек Гельмгольца, а также изменять направление вектора магнитной индукции относительно исследуемой планарной структуры.

Библиографический список

1. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы / Пер. с польск. В. И. Тихонова и К. Б. Макидонский, под ред. О. К. Хомерики – М.: Энергия, 1971. 352 с.
2. Бабаев Р. М., Тихонов В. И., Портной Г. Я. Датчики Холла на основе пленочных эпитаксиальных структур арсенида галлия. // Приборы и системы управления. 1976. № 3. С. 42-43.

3. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Миронов А. Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. – М.: Наука, Глав. ред. физ. мат. лит., 1972. 417 с.
4. Михайлов А. И., Митин А. В., Кожевников И. О. Функциональный однокристальный преобразователь свет-частота на основе высокоомного n-GaAs // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17, № 4. С. 64-69.
5. Михайлов А. И., Митин А. В., Кожевников И. О. Особенности возникновения устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2015. Т. 58, № 4. С. 59-64.
6. Кожевников И.О., Михайлов А.И. Оптические характеристики однокристального функционального генератора на основе высокоомного n-GaAs // III Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»: Сборник трудов конференции (электронная версия). Санкт-Петербург.: СПбГЭТУ, 2014. URL: <http://mwelectronics.ru/2014/oral.html> (дата обращения: 22.02.16).
7. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Магниточувствительные транзисторы. Обзор. // ФТП. 2001. Т. 35, В. 1. С. 3-10.

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

*Д.И. Биленко, О.Я. Белобровая, И.В. Галушка, Э.А. Жаркова, Д.О. Кочнев,
И.Б. Мысенко, В.П. Полянская, Д.В. Терин, Е.И. Хасина*
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: lab32@mail.ru

Пористый кремний был получен американским ученым А. Улиром в 1955 г. случайно, во время электролитической полировки монокристаллического кремния [1]. Таким образом, традиционным методом получения материала считается электрохимический. Однако, в последнее время, все большую популярность из-за своей нетребовательности и экономичности приобретают разновидности методов химического травления. Наибольшей востребованностью пользуются методы травления с участием металла (англ. metalassistedetching) [2, 3]. На основе проведенного литературного анализа, посвященных химическому травлению пористого кремния [3-7] были предложены два метода: одноэтапный и двухэтапный (далее, метод 1 и 2). Получение пористого кремния методом 1 осуществлялось путем реакции осаждения Ag на подложку с замещением Si в водном растворе 0,02M AgNO₃ и 5M HF в течение 60 минут с последующим травлением образовавшегося на поверхности дендритного слоя Ag. Метод 2 включал в себя два этапа. Первый состоял из погружения подложки в раствор HF (4.8M) + AgNO₃ (0.005M) для осаждения на ней Ag. Время погружения составляло 1 минуту. На втором этапе происходило непосредственное травление с получением por-Si в растворе HF (4.8M) + H₂O₂ (0.5M) в течение 60 минут.

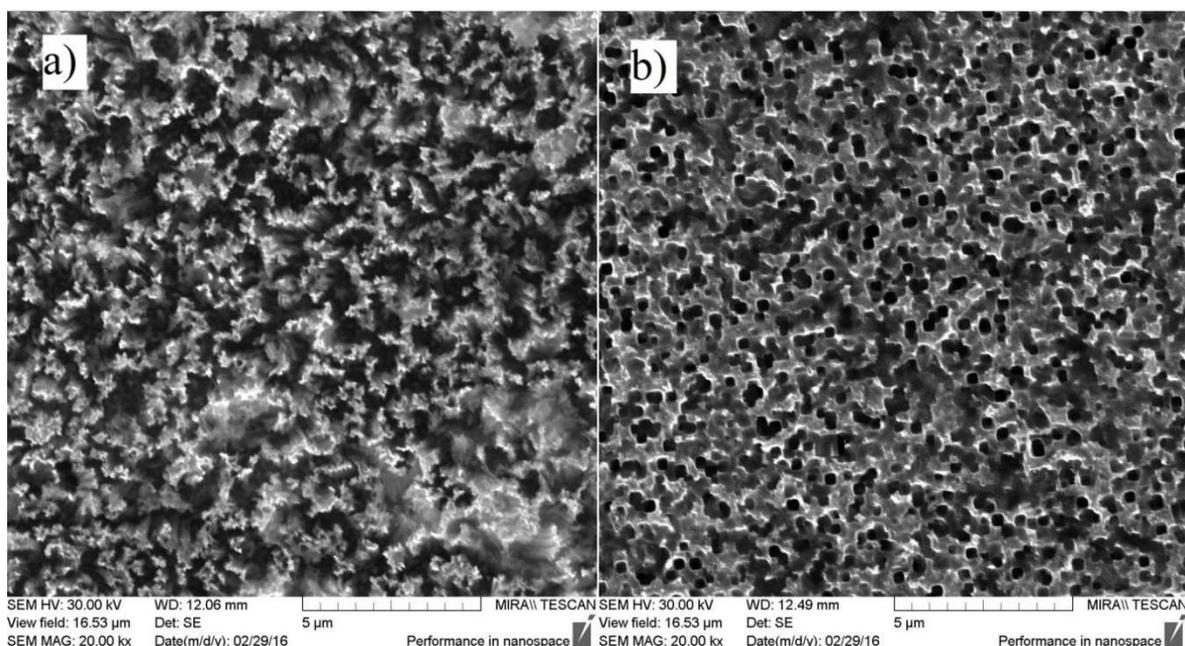


Рис. 1. Морфология образцов р-типа, полученных а) методом 1, б) методом 2

В качестве подложек нами использовались пластины монокристаллического кремния р-типа КДБ - 4,5 с ориентацией $\langle 100 \rangle$ и n-типа такого же удельного сопротивления и с той же ориентацией.

Для исследования поверхности полученного por-Si и оценки эффективности травления нами был произведен сравнительный анализ морфологии образцов, полученных разными методами, на сканирующем электронном микроскопе SEM MIRA II LMU. Полученные изображения образцов р-типа представлены на рис. 1. Если в первом случае а) мы можем наблюдать хаотичный кремниевый скелет, то морфология образца б) имеет сравнительно упорядоченную структуру с четко оформленными порами. Для образцов n-типа наблюдалась аналогичная картина.

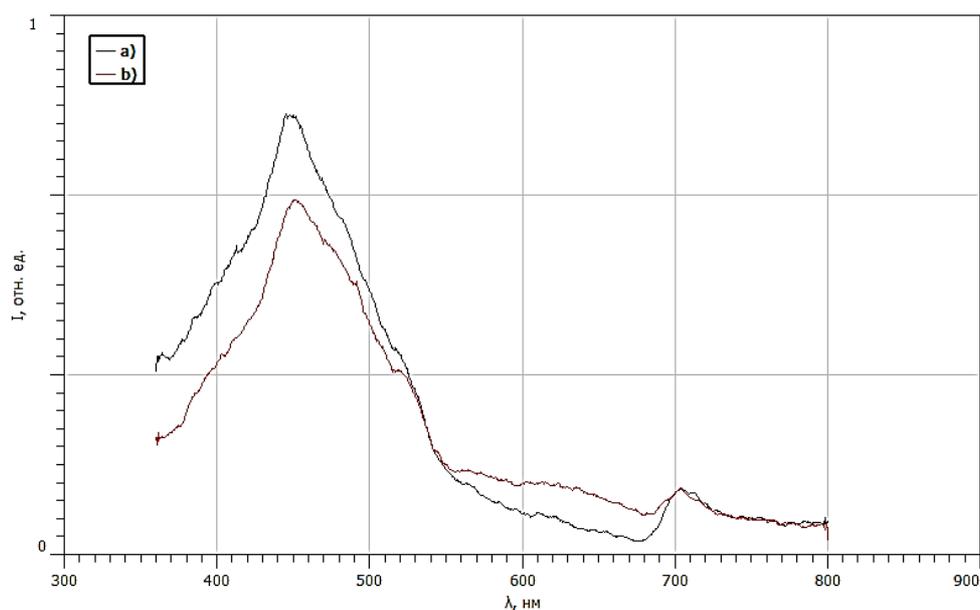


Рис. 2. Фотолюминесценция образцов р-типа, полученных а) методом 1, б) методом 2

Нами было проведено исследование фотолюминесцентных свойств полученных образцов. Пористый кремний обладает достаточно широким спектром люминесценции, которая может варьироваться от 750 нм (красный свет) до 450 нм (голубой) в зависимости от размеров нанокристаллитов и степени окисления [8]. Образцы показали фотолюминесцентные свойства в коротковолновом диапазоне спектра на уровне 448 нм (а) и 452 нм (b). Все образцы показали схожие характеристики фотолюминесценции, лишь немного различающиеся по интенсивности. Получение ИК спектров производилось на спектрометре Shimadzu-FourierTransformInfraredSpectrophotometerIRTracer-100. Для образцов, полученных методом 2, наблюдается сильное смещение значений частот и падение пропускания в высокочастотном диапазоне, по сравнению с исходной подложкой, что можно наблюдать на рис. 3.

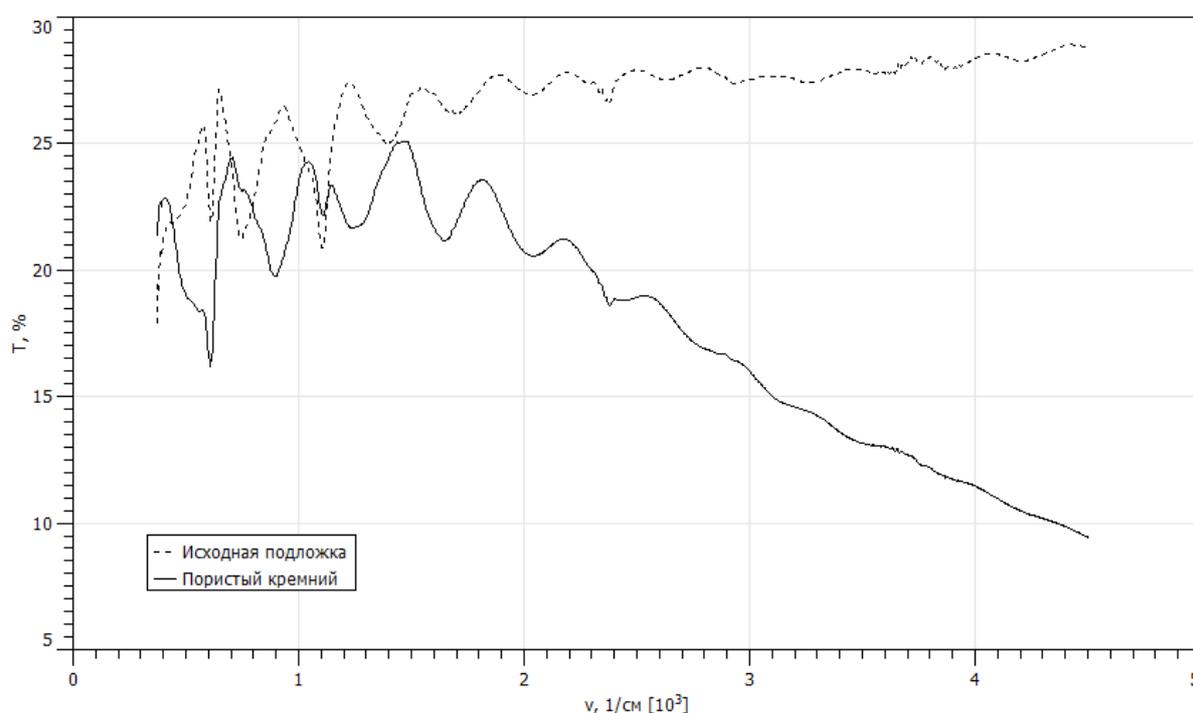


Рис. 3. Сравнение ИК – спектра полученного образца пор – Siр-типа с исходной подложкой

Полученные в ходе исследования данные позволяют наблюдать качественные сходства и различия между свойствами структур пористого кремния, полученных различными разновидностями химического метода травления с участием металла. Перспективы применения подобных структур обусловлены значительным многообразием их функциональных возможностей в широком диапазоне воздействий, в частности для создания самовосстанавливающихся интеллектуальных материалов и/или самоуничтожающейся элементной базы.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания министерства образования и науки Российской Федерации. Проект №3468: Фазовая и структурная модификация микро- и наноструктур электромагнитным излучением широкого диапазона энергий.

Библиографический список

1. *Uhlir A.* Electrolytic shaping of germanium and silicon // *Bell Syst. Tech.* 1956. V.35. №2. P.333–347.
2. *Han H., Huang Z., Lee W.* Metal-assisted chemical etching of silicon and nanotechnology applications // *Nano Today.* 2014. №9. P.271–304.
3. *Galushka V.V., Bilenko D.I., Terin D.V., Revzina E.M., Kondratyeva O.Yu., Kozhevnikov I.O.* Controlled Investigation of Mass Transfer in Nanostructures AgI-Ag // *BioNanoScience.* 2015. № 5. P. 227-232.
4. *Najar A., Slimane A. B., Hedhili M. N., Anjum D., Sougrat R.* Effect of hydrofluoric acid concentration on the evolution of photoluminescence characteristics in porous silicon nanowires prepared by Ag-assisted electroless etching method // *Journal of Applied Physics.* 2012. №112. P.2–6.
5. *Iatsunskyi I., Smyntyna V., Pavlenko N., Sviridova O.* Peculiarities of Photoluminescence in Porous Silicon Prepared by Metal-Assisted Chemical Etching // *ISRN Optics.* 2012. P.1–6.
6. *Linhan L., Siping G., Xianzhong S., Jiayou F., Yan W.* Synthesis and Photoluminescence Properties of Porous Silicon Nanowire Arrays // *Nanoscale Res Lett.* 2010. №5. P.1822–1828.
7. *Jing Z., Yin W., Hui F.* Uniform axial orientation alignment of one-dimensional single-crystal silicon nanostructure films // *Angewandte Chemie International Edition.* 2005. V.44. Iss.18. P.2737–2742.
8. *Пул Ч., Оуэнс Ф.* *Нанотехнологии.* - Москва: Техносфера, 2005. С. 140–142.

ФАЗОСДВИГАЮЩЕЕ ЭКСПОНИРОВАНИЕ В ФОТОЛИТОГРАФИИ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ ЭРМИТА-ГАУССА НЕЧЕТНОГО ПОРЯДКА

А.С.Рудницкий, Н.Н.Полецук

Белорусский государственный университет

E-mail: Rudnitsky@bsu.by

Задачи формирования структуры волнового поля с заданными топологическими свойствами и качественного переноса ее фотохимическими методами на материальную среду лежат в основе технологических процессов микро- и наноэлектроники, дифракционной оптики, голографии. На каждой из стадий процесса фотолитографии действуют искажающие исходный рисунок шаблона факторы. Одним из основных эффектов, ограничивающих минимально достижимые размеры элементов в фотолитографии, является дифракция излучения при его прохождении сквозь фотошаблон [1-3]. При дифракции света на двух элементах, расположенных достаточно близко друг к другу, возможна ситуация, при которой они становятся неразличимыми. Одним из способов повышения разрешения и уменьшения размеров в фотолитографии является использование фазосдвигающих масок. Концепция их работы заключается в подавлении дифракции излучения при его прохождении через фотошаблон за счет изменения фазы излучения на 180° в определенных областях маскирующего слоя [4].

Это позволяет увеличить контраст и разрешение в фотолитографии. Существует несколько способов реализации фазосдвигающих шаблонов, различающихся по конфигурации элементов в маскирующем слое [5]. Более простым способом улучшения разрешения в фотолитографии является экспонирование с применением внеосевого освещения (off-axis illumination). В этом случае фазовый сдвиг обеспечивается тем, что угол падения света выбирается таким образом, чтобы соседние линии освещались лучами с противоположными фазами.

В данной работе рассматривается способ фазосдвигающего экспонирования световым пучком Эрмита-Гаусса нечетного порядка. В качестве примера используется двумерный пучок первого порядка. Рассматривается простейшая приближенная математическая модель дифракции волнового поля на расположенном в плоскости $z=0$ непрозрачном экране с двумя параллельными щелями. Дифракционное поле рассчитывалось на расстоянии $z=h$ от экрана по формуле Рэлея-Зоммерфельда

$$v(x, z) = \int_{-c}^{-d} \left[v(\xi) \frac{\partial G}{\partial \zeta} \right]_{\zeta=0} d\xi + \int_d^c \left[v(\xi) \frac{\partial G}{\partial \zeta} \right]_{\zeta=0} d\xi, \quad v(\xi) = 2\sqrt{2} \frac{\xi}{\rho} \exp\left(-\frac{\xi^2}{\rho^2}\right),$$

$$G(x, \xi, z, \zeta) = \frac{i}{2} H_0^{(2)}\left(k\sqrt{(x-\xi)^2 + (z-\zeta)^2}\right), \quad u(x) = |v(x)|.$$

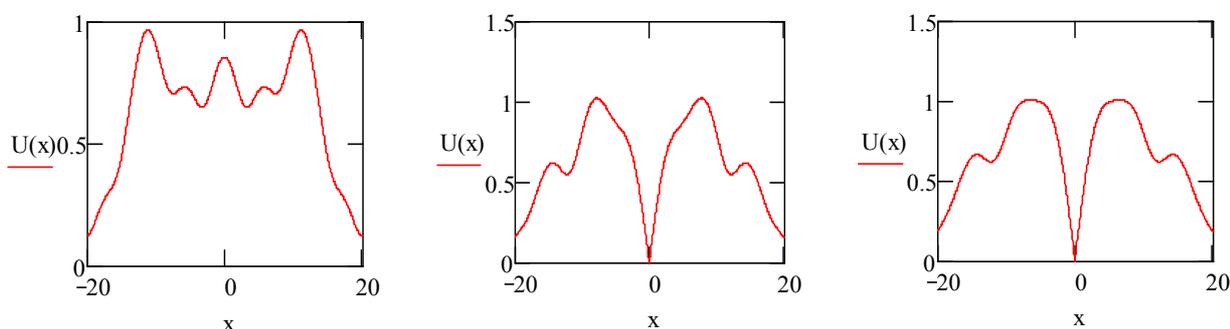


Рис.1. Распределение амплитуды дифракционного волнового поля

На рис.1 представлены результаты его расчета при следующих значениях (в длинах волн) геометрических параметров задачи $\tilde{n} = 13, d = 3, h = 130, \rho = 9$ и засветке фазосдвигающего фотошаблона плоской волной (второй график) и фотошаблона плоской волной (первый график) и гауссовым пучком (третий).

Как видно из первого графика, дифракция приводит к сложению световых потоков в зазорах между элементами и слиянию топологических элементов. Разрешение элементов достигается при использовании фазосдвигающего фотошаблона и при засветке обычного фотошаблона гауссовым пучком нечетного порядка, как показано на втором и третьем графиках соответственно.

Библиографический список

1. *Seisyan R.P.* Nanolithography in Microelectronics. A Review // Technical Physics. 2011. V. 56, N. 8. P. 1061 – 1073.
2. *Levinson H.J.* Principles of Lithography // SPIE Press. 2005. 423 p.
3. *Alkaisi M.M., Blaikie R.J., MsNab S.J., Cheung R., Cumming D.R.S.* Subdiffraction-limited patterning using evanescent near-field optical lithography // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75(22). P. 3560-3562.
4. *Levenson M.D., Viswanathan N.S., Simpson R.A.* Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask // IEEE Trans. Electron. Devices. 1982. V. 29(12). P. 1828 - 1836.
5. *Liu Y., Pfau A., Zakhora.* Systematic Design of Phase-Shifting Masks with Extended Depth of Focus and/or Shifted Focus Plane // IEEE Trans. On Semiconductor Manufacturing. 1993. V. 6(1). P. 1–21.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ПРИ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Д.А. Усанов, Ан.В. Скрипаль, Е.И. Астахов, И.С. Костюченко
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: usanovda@info.sgu.ru

В последние годы получило существенное развитие новое направление интерферометрии, известное как интерферометрия с оптической обратной связью. Развитие этого направления, которое позволило решить задачи определения направления движения исследуемого объекта, расстояния до объекта, связано с использованием токовой модуляции излучения полупроводникового лазера. Основными методами токовой модуляции являются линейная и гармоническая модуляции длины волны излучения лазера. Целью работы явился сравнительный анализ методов измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции длины волны излучения

В работе [1] продемонстрирована возможность измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера с линейной токовой модуляцией. Сигнал с фотодетектора имеет треугольную огибающую за счет треугольной токовой модуляции лазерного диода и интерференционную модуляцию, формируемую при изменении фазы отраженного от объекта лазерного излучения [1]. Зависимость изменения мощности протектированного сигнала от времени при инжекционном токе 50 мкА, заданном расстоянии 40 см, длине волны лазерного излучения $\lambda = 650$ нм приведена на рис.1. Здесь же приведена зависимость производной мощности по времени, используемая для анализа количества пиков N на участках подъема и спада автодинного сигнала.

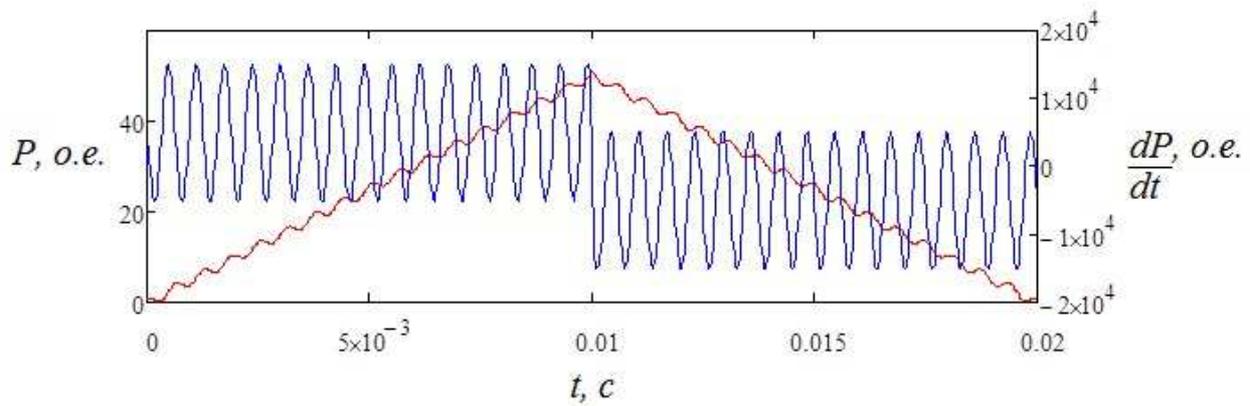


Рис. 1.Изменение автодинного сигнала от времени t при инжекционном токе 50мкА и заданном расстоянии 40 см

Расстояние до объекта в данном методе определяется соотношением:

$$L = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \Delta\lambda} \cdot N, \quad (1)$$

где L – расстояние от излучателя до объекта; N – количество пиков автодинного сигнала; λ – длина волны излучения лазера; $\Delta\lambda$ – изменение длины волны на одном периоде.

На рис. 2 приведен спектр автодинного сигнала, изображенного на рис.1. На спектре отчетливо выделяется частота автодинного сигнала с наибольшей амплитудой. По частоте спектральной составляющей с максимальной амплитудой, можно рассчитать расстояние до объекта для смоделированного автодинного сигнала по соотношению (1).

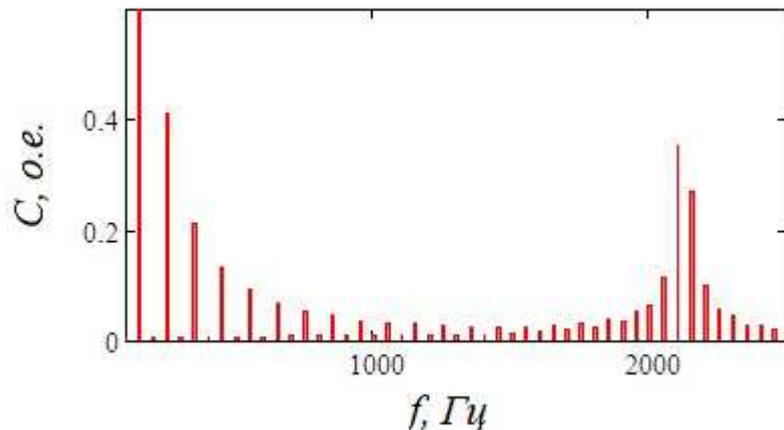


Рис. 2.Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис.1

Для определения точности данного метода были рассчитаны значения различных расстояний до объекта. Показано, что данный метод с точностью до 0,1 процента позволяет определять расстояние при L более 50 см. При меньших расстояниях до объекта, данный метод дает большую погрешность, до 3,7%.

Нами для сравнения моделировался автодинный сигнал с гармонической токовой модуляцией излучения лазера [3]. Моделирование с использованием дан-

ного метода проводилось при параметрах: длина волны лазерного диода $\lambda=650$ нм, девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода $\omega_A=10 \cdot 10^9$ рад/с. На рис. 3 и 4 представлена зависимость мощности излучения лазерного диода от времени и ее спектр при расстоянии до объекта 40 см.

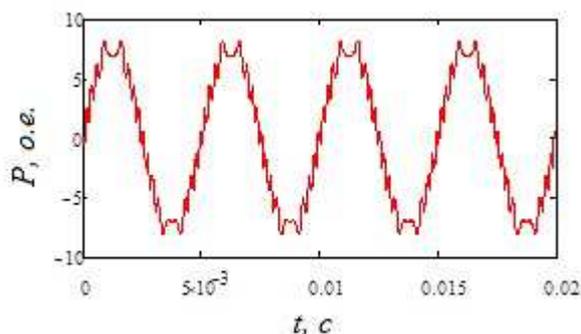


Рис.3. Зависимость мощности излучения лазерного диода от времени

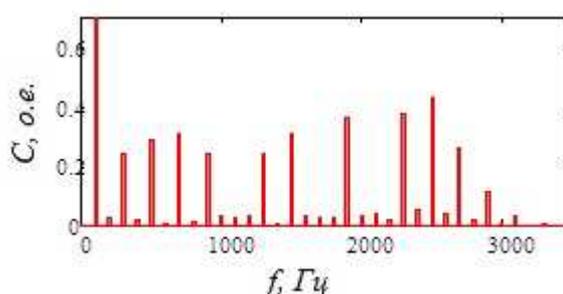


Рис. 4. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 3

Для определения расстояния до объекта L , входящего в параметр $\sigma = \omega_A \tau_0$, используем известные отношения $2n$ и $2n+2$ спектральных гармоник и отношение $2n+1$ и $2n+3$ спектральных гармоник [4]:

$$C_{2n}/C_{2n+2} = (J_{2n}(\sigma))/(J_{2n+2}(\sigma)), \quad (2)$$

$$C_{2n+1}/C_{2n+3} = (J_{2n+1}(\sigma))/(J_{2n+3}(\sigma)). \quad (3)$$

Решение уравнений (2) и (3) относительно неизвестного параметра $\sigma = \omega_A \tau_0$, требует знания параметров токовой модуляции лазерного автодина, в частности, девиации частоты излучения лазерного диода ω_A . Принимая во внимание, что $\tau_0 = 2 \cdot L/c$, соотношение для определения расстояния до объекта имеет вид: $L = c \cdot \sigma / 2\omega_A$.

Исследование влияния шума на детектируемый автодинный сигнал показало, что в методе с гармонической модуляцией погрешность уменьшается с уменьшением расстояния до объекта.

Сравнение двух методов показывает, что метод с линейной токовой модуляцией имеет погрешность до 0,1% при измерении расстояний более 40 см. Метод с гармонической токовой модуляцией имеет преимущества при определении расстояний менее 40 см вплоть до 10^{-4} м.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).

Библиографический список

1. Giuliani G., Donati S. Laser Interferometry // Unlocking Dynamical Diversity: Optical Feedback Effects on Semiconductor Lasers. P.217-255.
2. Соболев В.С., Щербаченко А.М., Харин А.М. Применение активной лазерной интерферометрии с частотной модуляцией для оценки наноперемещений и нановибросмещений диффуз-

но отражающих объектов// С26 ГЕО-Сибирь-2010. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. 2010. Т. 5. Ч. 1. С. 119-124.

3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях // Саратов: Изд-во Сарат. ун-та. 2013. С.54-60.
4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С. Определение расстояния до объекта с помощью частотномодулированного полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 21. С. 72-77.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОПЕРЕНОСА В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ – ОРГАНИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ»

В.О. Лукьянова, И.В. Маляр

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского
e-mail: lukyanova.viky@yandex.ru

Гибридные структуры, состоящие из органических и неорганических компонентов, представляют интерес для различных областей науки [1]. В частности, структуры на основе неорганических полупроводников могут быть использованы в микроэлектронике [2], датчиках [3] и фотоэлектрических приборах [4].

Существует несколько моделей [2], описывающих токоперенос в гибридных структурах, влияющий на их электрические свойства. Также имеются модели переноса заряда в органических молекулах [5], которые были использованы для оценки электрических свойств гибридных структур с органическими слоями. Таким образом, механизмы проводимости следует рассматривать отдельно для каждой отдельной гибридной структуры.

В данной работе были измерены электрические свойства гибридных структур, состоящих из кремниевых подложек, покрытых монослоями полиэлектролита и анионного красителя. Исследования проводились с помощью измерения туннельного тока.

Были использованы подложки *n*-Si (100) с удельным сопротивлением $\rho = 3-6 \text{ } \Omega \cdot \text{см}$, которые кололись на квадраты размером 13 мм и обрабатывались в перекисно-аммиачном растворе. Далее на подготовленные подложки *n*-Si (100) проводилась адсорбция катионного полиэлектролита полиэтиленimina (PEI). Часть кремниевых подложек во время осаждения PEI освещалась, аналогично [6]. После на образцы Si/PEI адсорбировался фоточувствительный анионный полиэлектролит трисульфогфталоцианин гидроксиалюминия (AlPcS_3), известного как «Фотосенс». При этом часть образцов также освещалась, как при адсорбции полиэтиленimina.

Для характеристики полученных образцов был использован сканирующий туннельный микроскоп «Nanoeducator». После сканирования поверхности в ре-

жиме постоянного тока проводились измерения туннельного тока от приложенного напряжения в интервале от -5 до $+5$ В.

На рис. 1а представлены измеренные зависимости туннельного тока от напряжения, демонстрирующие выпрямляющий характер. Поэтому для их анализа использовалось модифицированное уравнение для термоэлектронной эмиссии в полупроводниках (1):

$$\ln \left[\frac{I}{1 - e^{-\frac{qV}{k_B T}}} \right] = \ln(\sigma A^* T^2) + \frac{q}{k_B T} \left(-\phi_{Bn} + \frac{V}{n} \right) \quad (1)$$

где n – коэффициента неидеальности, и барьерной разности ($q\phi_B$), A^* – эффективная постоянная Ричардсона, T – температура, k_B – постоянная Больцмана.

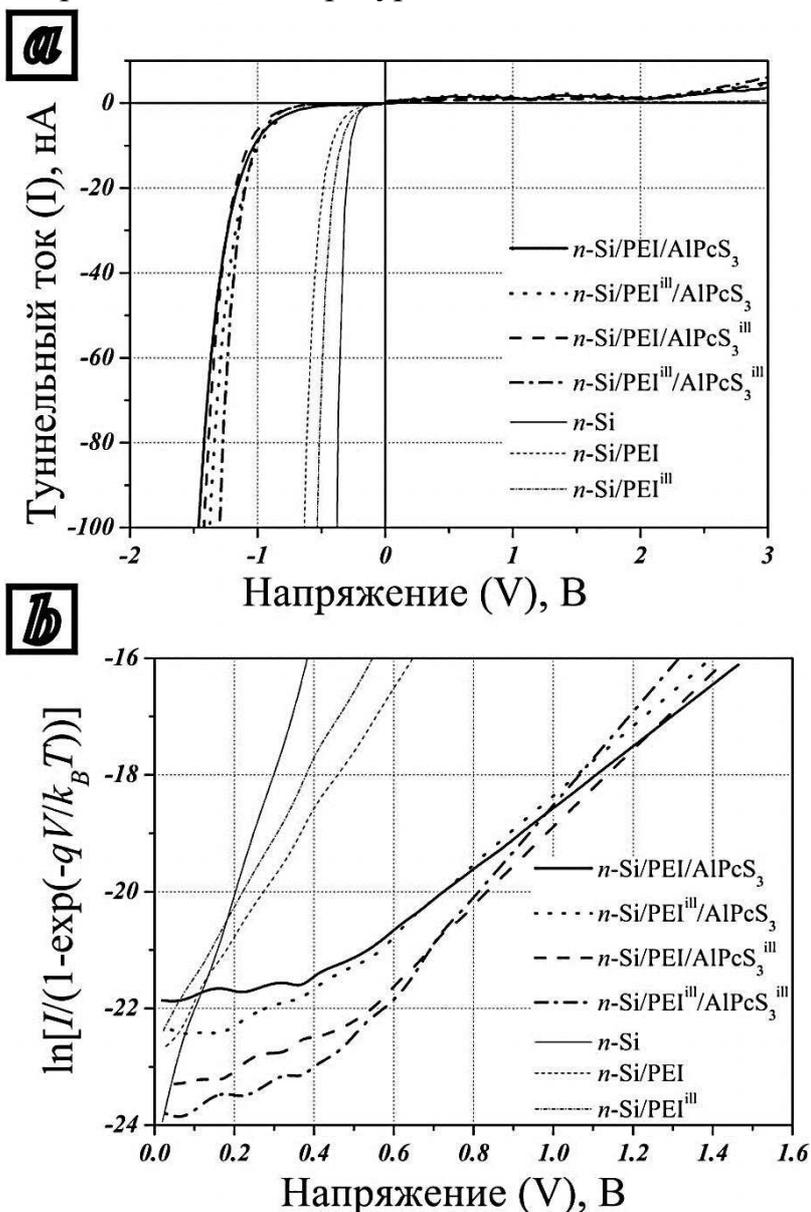


Рис. 1. Зависимость туннельного тока от напряжения в обычных координатах (а) и полулогарифмических (б) для разных образцов на основе кремния (Si), полиэтилена (PEI) и трисульфоталоцианин гидроксиалюминия (AlPcS₃). Индекс "III" указывает на освещение при адсорбции органического монослоя.

Для анализа измеренные зависимости были построены в координатах $\ln\left[\frac{I}{1-\exp(-qV/k_B T)}\right] - V$ (рис. 1b).

Представленные на рисунке 1b кривые показывают линейную зависимость при высоком напряжении и нелинейную при низком. При анализе полученных измерений можно сделать вывод, что при одном монослое на кремниевой подложке при низком напряжении механизм туннелирования электронов изменяется на механизм Пула-Френкеля для двух монослоев.

Из линейного участка находились величина потенциального барьера ($q\phi_B$) и коэффициент неидельности (n). В работе [7] было показано, что радиус аналогичных зондов составляет порядка 40 нм, а площадь туннельного контакта $\sigma = 248,7 \text{ нм}^2$, а, следовательно, $\ln(\sigma \cdot A^* \cdot T^2)$ для n -Si составляет -9.81. Было установлено, что адсорбция катионного полиэлектролита уменьшает высоту барьера для электронов в n -Si, а адсорбция анионного красителя «Фотосенс» увеличивает.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00524А).

Библиографический список

1. Sanchez C., Belleville P., Popalld M., Nicole L. Applications of advanced hybrid organic–inorganic nanomaterials: from laboratory to market // Chem. Soc. Rev. 2011. V.40. P.696-753.
2. Ortiz R.P., Facchetti A., Marks T.J. High-k Organic, Inorganic, and Hybrid Dielectrics for Low-Voltage Organic Field-Effect Transistors // Chem. Rev. 2010. V.110. P.205–239.
3. Wang S., Kang Y., Wang L., Zhang H., Wang Y., Wang Y. Organic/inorganic hybrid sensors: A review // Sensors and Actuators B: Chemical. 2013. V.182. P.467–481.
4. Wright M., Uddin A. Organic—inorganic hybrid solar cells: A comparative review // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. V.107. P.87-111.
5. Ulgut B., Abruna H.D. Electron Transfer through Molecules and Assemblies at Electrode Surfaces // Chem. Rev. 2008. V.108. P.2721–2736.
6. Стецюра С.В., Козловский А.В., Маляр И.В. Электрическая пассивация поверхности кремния полиэлектролитным покрытием // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 4. С.24-32.
7. Malyar I.V., Gorin D.A., Stetsyura S.V. Effect of Nanodimensional Polyethylenimine Layer on Surface Potential Barriers of Hybrid Structures Based on Silicon Single Crystal // Proc. SPIE. 2012. V.8700. P.870009–870009-9.

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПЛЁНОК SnO₂ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

О.С.Махди^{1,2}, И.В.Маляр¹, И.В.Синёв¹, С.Б.Вениг¹, В.В.Кисин¹

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

² Al-Muthanna University (Университет Аль-Мутанна), Ирак

e-mail: kisin@sgu.ru

Оксид олова является одним из наиболее широко применяемых материалов для создания сенсоров газа. Газочувствительность сенсоров на основе этого материала определяется процессами на поверхности зерен, составляющих пленку, влияющих на её электрическую проводимость. Основными из них являются изменение концентрации вакансий кислорода в объёме, за счёт обмена с поверхностью, адсорбция частиц из газовой фазы, индуцирующих донорные или акцепторные уровни, протекание химических реакций на поверхности зерен, приводящих к изменению заполнения центров адсорбции. Указанные процессы, а также токоперенос через границы зерён активационно зависят от температуры [1]. Таким образом рабочая температура сенсоров на основе SnO₂, как правило, превышает 150°C, что позволяет обеспечить приемлемые значения порога обнаружения, времён отклика и восстановления. Однако поддержание высокой рабочей температуры приводит к высокой потребляемой мощности и ограничивает применение сенсоров газа.

В настоящее время исследуется возможность снижения рабочих температур для плёнок SnO₂ до значений близких к комнатным [2]. Такой подход позволит существенно снизить энергопотребление сенсоров. Было установлено, что снижения рабочей температуры сенсора можно достичь путем уменьшения размеров зерён плёнки. В данной работе исследуется морфология, а также фазовый состав плёнок SnO₂ чувствительных к парам этанола при 38°C.

Плёнки диоксида олова наносились методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления в установке типа PVD 600 (Vac-Tec, Республика Корея). В качестве подложки использовались пластины кремния с ориентацией (100) в плоскости подложки.

Была определен отклик сенсора на воздействие паров этанола при температуре 38°C. Сопротивление активного слоя сенсора измерялось с помощью потенциометрической схемы.

Для характеристики морфологии использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) типа Mira II LMU (Tescan, Чехия) и зондовой нанолaborатории NTGRA Spectra (NT-MDT, Россия). Для измерения состава образцов использовались приставка X-stream для СЭМ от Oxford Instruments (Англия) для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и Оже-спектрометр PHI 4300

(Perkin-Elmer, США), оснащённый аргоновой ионной пушкой с дифференциальной откачкой и квадрупольным масс-анализатором.

Измерения газочувствительности полученных образцов показали, что введение в измерительную камеру насыщенных паров этанола приводит к уменьшению сопротивления образца более чем на три порядка величины, а последующая продувка чистым воздухом – к частичному восстановлению сопротивления образца. На кривой отклика сенсора на воздействие паров этанола можно было выделить два процесса с характерным временем 8 и 40 с. При продувке чистым воздухом сопротивление возрастало линейно со скоростью 200 кОм/с в течение первых 50 мин, затем скорость снижалась до 150 кОм/с.

На рис. 1а представлено СЭМ изображение скола образца, на котором видно, что плёнка SnO₂ состоит из зёрен, ориентированных перпендикулярно поверхности подложки. Поперечный размер зёрен возрастает к поверхности плёнки от 6 нм вблизи подложки до 13 нм вблизи поверхности. Измерения рельефа поверхности методом атомно-силовой микроскопии показали (рис. 1б), что поверхность неоднородна, и состоит из кристаллитов, средний диаметр которых составляет порядка 15 нм, что коррелирует с данными СЭМ.

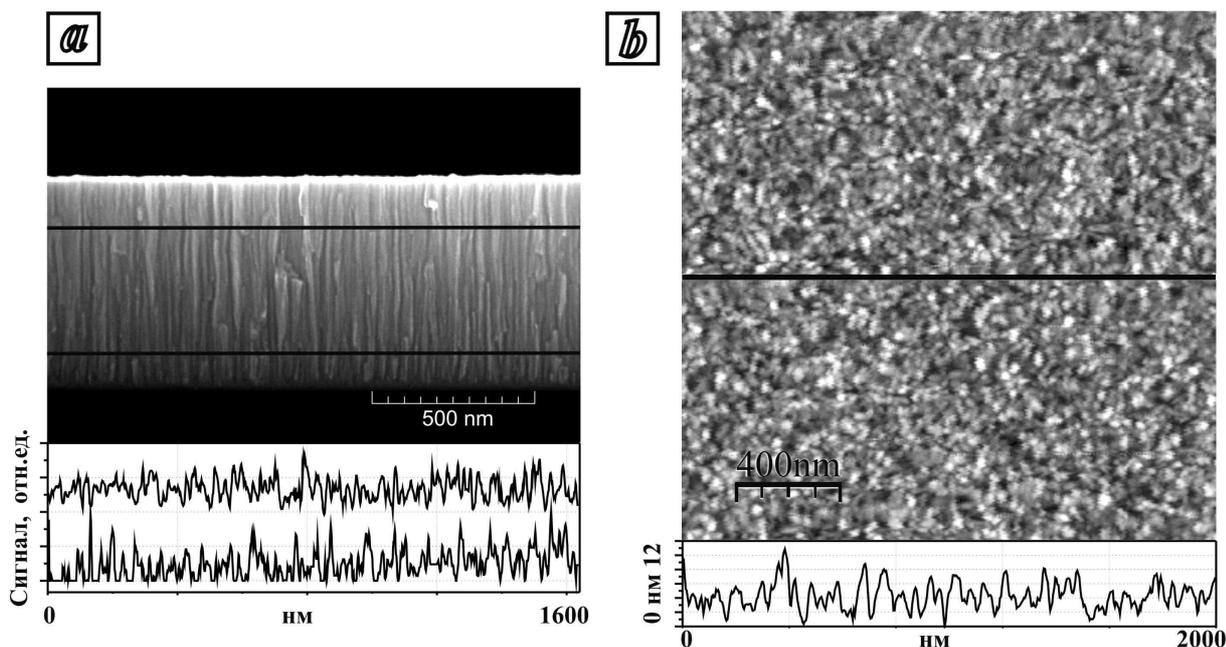


Рис. 1. СЭМ-изображение скола образца с продольными сечениями (а) и АСМ-изображение поверхности образца с продольным сечением (б)

Измерение состава методом электронной Оже-спектроскопии показало, что поверхность соответствует монооксиду олова. Измерение концентрационных профилей методом вторичной ионной масс-спектрометрии показало, что существует приповерхностный слой толщиной порядка 8 нм, в котором состав меняется от SnO до SnO₂. При этом в объёме существует некоторый избыток олова (35 мол. %), что может свидетельствовать о том, что поверхность зёрен в

объёме плёнки также имеет состав SnO. Измерения методом ЭДС также показывают, что состав плёнок это SnO₂ с незначительным избытком олова (33,9 мол. %).

Таким образом, было установлено, что плёнки оксида олова, обладающие чувствительностью к парам этанола при комнатной температуре (38°C), состоят из зёрен с нанометровым поперечным размером, ориентированных по нормали к поверхности подложки. Между зёрнами есть поры, что обеспечивает доступ газов из окружающей атмосферы к поверхности зёрен по всей толщине плёнки. Измерения состава показали, что состав поверхности образцов соответствует SnO, а объём – SnO₂ с небольшим избытком олова. Мы предполагаем, что это характерно не только для всего образца, но и для зёрен, из которых он состоит, то есть они состоят из SnO₂, а на поверхности есть нанослой SnO. Кроме того, избыток олова в объёме образца может косвенно свидетельствовать, что поры являются открытыми.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00633 мол_а.

Библиографический список

1. *Moseley P. T.* Solid state gas sensors // Measurement science and technology. 1997. V.8. P.223–237.
2. *Zhang J., Liu X., Neri G., Pinna N.* Nanostructured Materials for Room-Temperature Gas Sensors // Advanced Materials. 2016. V.28. P.795-831.

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ СТЕКЛОУГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕН-ГРАФЕНОВОЙ АТОМИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А. А. Зыктин, О. Е. Глухова

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

E-mail: zyktin.a.a@gmail.com

Как известно, углерод существует во многих аллотропных состояниях. Кроме алмаза и графита, хорошо известны нанотрубки, графен и пористый углерод, который часто называют стеклоподобным [1]. Стеклоуглерод, обнаруженный в 1957 году в виде фуллерено-подобных плотно упакованных моно- и few-layer "чаш", хаотично расположенных sp²-наноструктур, представляет собой нанопористый материал. При размерах пор в несколько нанометров плотность достаточно мала и составляет ~1,5 г/см³. Еще в конце 20 века стеклоуглерод начал применяться для изготовления матричных автоэмиссионных катодов.

дов [2], обеспечивающих стабильный ток. Эмиттер из стеклоуглерода имел радиус скругления 2 нм. Работа выхода стеклоуглерода составляла 4,6 эВ, что отвечает работе выхода графита. Современная электроника также использует стеклоуглерод и композиты на его основе в качестве источника электронов. Подвергаемые ионной бомбардировке Ar^+ , образцы стеклоуглерода обеспечивают низкотемпературный стабильный эмиссионный ток [3], а стеклоуглеродные зерна демонстрируют высокую вторичную эмиссию [4]. Керамический композит, содержащий допированный азотом пористый стеклоуглерод (Mesoporous Nitrogen-Doped Carbon-Glass), является очень перспективным материалом для создания катода твердотельных литиево-ионных батарей. Время перезарядки батарей уменьшается в шесть раз [5]. Многоуровневая компоновка острий матричных катодов на основе стеклоуглерода позволяет сегодня получать достаточно большие токи $\sim 2 \cdot 10^9$ А/см² [6]. Однако, возможности стеклоуглерода в эмиссионной электронике не исчерпаны, поскольку на данный момент не была использована возможность заполнять его нано- и микропоры веществом, способным понизить работу выхода. С другой стороны, не исследованы особенности окисления стеклоуглерода с позиции влияния на электронную структуру, хотя кислород как активный элемент наиболее вероятно будет насыщать края наноструктур, образующих поры. В этой ситуации важно оценить, насколько заметно окисление будет снижать эмиссионную способность стеклоуглерода. Легирование калием стеклоуглерода также активно не исследовалось, хотя и проводились работы по насыщению поверхности стеклоуглерода калием с целью придания ей гидрофильных свойств. Заметим, что в последние годы интерес к этому пористому углероду возрос, что обусловлено возможностями электронной микроскопии, открывшей особенности строения этого материала и его уникальные механические свойства [7]. Это позволило не только построить достаточно точные атомистические модели стеклоуглерода, но и сделать его классификацию по топологии. Если раньше стеклоуглерод подразделялся просто на графетизированный (анизотропный материал из многослойных чешуек графена, образующих подобие слоев) и неграфетизированный (чешуйки графита хаотично расположены) [8], то сейчас даже неграфитизированный стеклоуглерод подразделяется на два класса. Тип IGC состоит в основном из распределённых случайным образом изогнутых слоев графеновых фрагментов. Туре-IGC содержит самоорганизующиеся нанометровые фуллереноподобные сфероиды и 3D неупорядоченные многослойные графеновые чешуйки. [1, 7].

В данной работе *in silico* исследуются особенности окисления и легирования калием пористого стеклоподобного графен-фуллеренового углерода, а также влияние этих процессов на зонную структуру и эмиссионные свойства.

Библиографический список

1. *Harris P. J. F.* Fullerene-like models for microporous carbon // J. Mater Sci. 2013. V. 48 P. 565-577.
2. *Luo K., Shi Z., Varesi J.* Sensor nanofabrication, performance, and conduction mechanisms in scanning thermal microscopy // J. Vac. Sci. Technol. B. 1997. N. 15. P. 349.
3. *Andrianova N.N.* Erosion of carbon fiber composites under high-fluence heavy ion irradiation // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 2007. P. 1-4.
4. *Richterov'a I., Fujita D., N'eme'cek Z.* Secondary Electron Yield of Glassy Carbon Dust Grains // WDS'08 Proceedings of Contributed Papers Part II. 2008. P. 68-73.
5. *Kichambare P., Rodrigues S., Kumar J.* Mesoporous Nitrogen-Doped Carbon-Glass Ceramic Cathodes for Solid-State Lithium–Oxygen Batteries // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2011. V. 4(1). P.49-52.
6. *Shesterkin V.I.* Effective Emission Area of Multiple Tip Autoemission Matrices Made of Glassy Carbon // Journal of Communications Technology and Electronics. 2014. V. 59, I. 8. P.833-837.
7. *Zhao Z., Wang E., Yan H.* Nanoarchitected materials composed of fullerene-like spherulids and disordered graphene layers with tunable mechanical properties // Nature Communications. 2015. T. 6. 6212.
8. *Franklin R.E.* Crystallite growth in graphitizing and nongraphitizing carbons // Proc. Roy. Soc. London. 1951. A209. P. 196-218.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

И.О. Кожевников, Е.М. Ревзина, О.Ю. Кондратьева, Д.В. Терин

Саратовский государственный университет имени

Н.Г. Чернышевского

E-mail: kozhevnikov_io@mail.ru

Математическое моделирование электронных процессов в полупроводниковых структурах широко применяется при проектировании различных полупроводниковых приборов, а также при интерпретации экспериментально полученных данных. Построение адекватных математических моделей, позволяющих учитывать взаимное влияние всех компонентов многослойных систем друг на друга, а также различных внешних воздействий (оптическое излучение, электрические и магнитные поля, и др.), является актуальной задачей полупроводниковой электроники.

Математические расчеты с применением систем высокого уровня (MathCAD, MatLAB, TCAD, Comsol Multiphysics, QuantumWise Atomistix ToolKit и др.) не требуют знаний системного программирования. Эти системы

позволяют в формализованном виде строить математические модели физических, химических процессов и явлений в любых материалах и средах [1,2]. Существует множество программных пакетов, позволяющих осуществлять расчет параметров и характеристик различных полупроводниковых приборов и интегральных схем. Все они основаны на встроенных математических моделях физических явлений и процессов, а именно систем уравнений, и методах численного моделирования, которые пользователь выбирает исходя из необходимой ему задачи. При этом подбор из многочисленного списка вариантов не всегда дает адекватный результат, сопоставимый с экспериментальными данными. В таком случае становится необходимым творческий подход и минимальные знания программирования.

В данной работе описывается методика настройки и адаптации математической модели с использованием среды быстрой разработки и программирования Delphy 7 на примере планарной многослойной арсенид-галлиевой структуры $n^+ - n - n^+$ с неидеальными омическими контактами. Данная среда в качестве языка программирования использует строго типизированный объектно-ориентированный язык, в основе которого лежит хорошо знакомый Object Pascal. Она выбрана как наиболее известная и имеющая большое количество доступной методической литературы (см. например [3]). Главными ее особенностями являются широкая функциональность и возможность производить моделирование динамики каких-либо процессов в исследуемых многослойных структурах, т.е. их визуализацию во времени.

Для описания динамики пространственного заряда и тока в полупроводниковых структурах, используется локально-полевая математическая модель (см. например [4,5]), включающая уравнение непрерывности и уравнение Пуассона с соответствующими граничными и начальными условиями, и являющаяся нелинейной системой уравнений с частными производными. Особенность использования данной модели с соответствующей системой уравнений и метода конечных разностей [6] для решения данной системы в сочетании со средой программирования Delphy 7 позволяет визуализировать с помощью встроенного графического модуля процесс изменения распределений $n(x)$, $E(x)$ и $\varphi(x)$ во времени, учитывать влияние внешних воздействий (например, оптического), выводя на экран всю необходимую информацию в виде чисел, графиков и индикаторов, а также изменять входные параметры модели (φ_k , N_d , τ , h , U_{cm}) и выполнять различные команды из главного окна созданной программы. Таким образом упрощается настройка и отладка модели, а ее адекватность устанавливается в результате численного и визуального (графического) сопоставления выходных параметров с известными физическими представлениями [7,8] или экспериментальными данными.

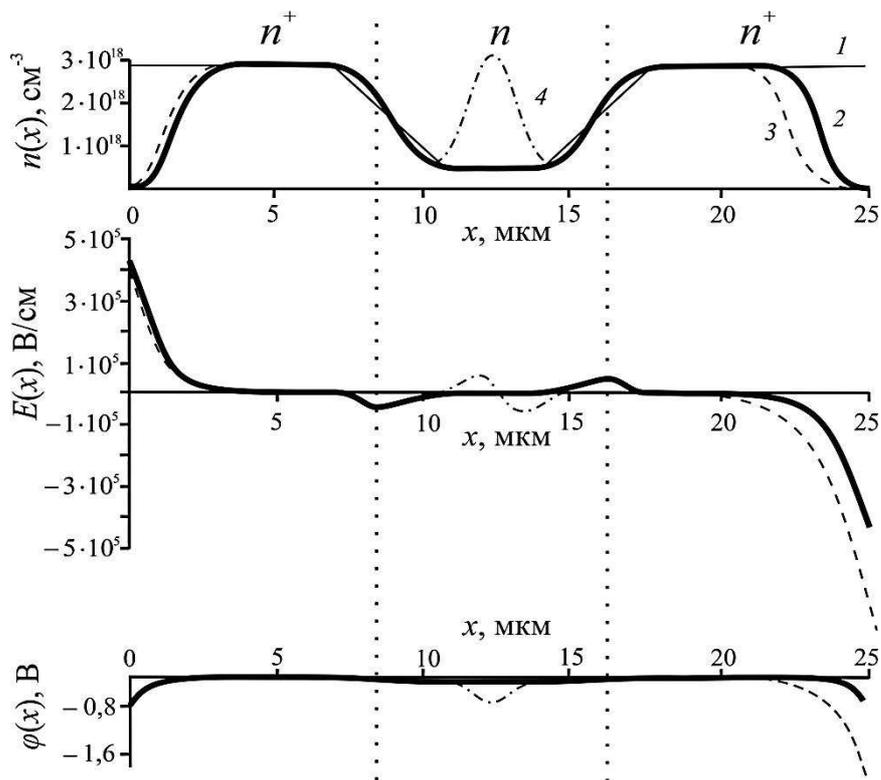


Рис. 1. Стационарные распределения концентрации электронов $n(x)$, электрического поля $E(x)$ и потенциала $\varphi(x)$ для структуры $Me - n^+ - n - n^+ - Me$ GaAs при различных условиях:
 1 – в начальный момент времени,
 2 – после установления ТД равновесия (установления решения),
 3 – при приложении внешнего электрического поля ($U_{см} = 1$ В),
 4 – при воздействии локальной засветки центральной области структуры

На рис. 1 показаны рассчитанные распределения концентрации, электрического поля и потенциала в многослойной $Me - n^+ - n - n^+ - Me$ структуре при различных условиях: в начальный момент времени, после установления решения, при приложении внешнего электрического поля и при воздействии локальной засветки центральной области структуры. Внешнее воздействие на структуру моделировалось как изменение соответствующих начальных и/или граничных условий модели. Сходимость решения достигалась выбором соотношения между шагом по времени τ и по координате h , а адекватность модели оценивалась по соответствию полученных распределений известным физическим представлениям.

Библиографический список

1. Биленко Д.И., Терин Д.В., Кондратьева О.Ю., Ревзина Е.М., Вениг С.Б. Методологические аспекты моделирования и прогнозирование поведения наноконпозиционных материалов в QUANTUMWISE / «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика», 2014. №2. С. 46–49.
2. Терин Д.В., Кондратьева О.Ю., Ревзина Е.М., Вениг С.Б. Оценка надежности нанобиосистем на основе теории копул. Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине: мате-

- риалы Всерос. Школы-семинара/ под ред. проф. Д.А.Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2015. С. 182–184.
3. *Осипов Д. Delphi. Профессиональное программирование.* СПб.: Символ-Плюс, 2006. 1056 с.
 4. *Павлов Г.П.* Границы применимости локально-полевых моделей полупроводниково-вых приборов // Математическое моделирование. 1990. Т.2, №3. С. 55–62.
 5. *Михайлов А.И., Митин А.В., Кожевников И.О.* Оптимизация алгоритма математической модели установления распределения заряда и электрического поля в многослойной полупроводниковой структуре с металлическими контактами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2013. № 4 (28). С. 133–146.
 6. *Турчак Л.И. Плотников П.В. Основы численных методов.* - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 304 с.
 7. *Шалимова К. В. Физика полупроводников* – СПб.: Изд-во «Лань», 2010. 400 с.
 8. *Стриха В. И. Контактные явления в полупроводниках* – Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1982. 224 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФЕН/ГРАФЕНОВЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

О.Е. Глухова, Д.А. Мельников, М.М. Слепченков

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: dennis.a.melnikov@gmail.com

В настоящее время графен и его производные составляют основу элементной базы электроники. Принципиально новым материалом, перспективным в наноэлектронике, является графен. После открытия графена и его необычных электронных свойств химическая функционализация графена стала предметом научного интереса современного материаловедения. Будучи первым истинно двухмерным кристаллом и демонстрируя высокую электронную подвижность, графен хорошо подходит для современной электроники [1]. Делокализация электронов в графене приводит к высокой электрической проводимости, что легло в основу идеи создания сверхбыстрых наноразмерных графеновых транзисторов [2]. В то же время, самой большой помехой к осуществлению подобных задач становится невозможность контролировать перемещение электронов в графене. Возможным решением этой проблемы может стать графен – функционализированный водородом графен. В данной работе наше внимание было сосредоточено на изучении электронных и оптических свойств нового слоистого графен/графанового материала с точки зрения его практического использования в устройствах микро- и наноэлектроники.

С помощью молекулярно-механического метода на основе потенциала AIREBO [3] была найдена равновесная конфигурация графеного листа,

расположенного на диэлектрической графеновой подложке. Атомная структура исследуемого гибридного материала представлена на рисунке 1.

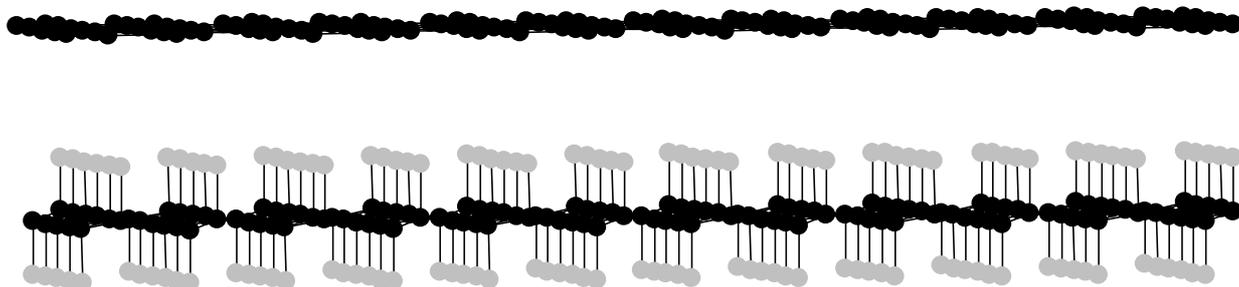


Рис. 1. Атомная структура графенового листа, расположенного на графеной подложке.

На следующем этапе исследования была выделена элементарная ячейка графена на графеновой подложке, и ее геометрическое строение было уточнено с помощью модифицированного самосогласованного метода функционала плотности в приближении сильной связи (SCC DFTB) [4]. Для построенной элементарной ячейки композитной структуры графен/графан были рассчитаны зонная структура и тензор комплексной оптической проводимости. Расчеты осуществлялись с помощью программы MIZAR [5]. С целью выявления закономерностей в полученных результатах выполнены расчеты зонной структуры и оптических характеристик графена и графана, входящих в состав исследуемого композита.

Работа выполнена при поддержке госзадания №3.1155.2014/К и стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-3135.2016.1.

Библиографический список

1. *Elias D. C., Nair R. R., Mohiuddin T. M., Morozov S. V., Blake P., Halsall M. P., Ferrari A. C., Boukhvalov D. W., Katsnelson M. I., Geim A. K., Novoselov K. S.* Control of graphene's properties by reversible hydrogenation: evidence for graphane // *Science*. 2009. V. 323. P. 610-613.
2. *Beibei Zhan, Chen Li, Jun Yang, Gareth Jenkins, Wei Huang, Xiaochen Dong* Graphene Field-Effect Transistor and Its Application for Electronic Sensing // *Small*. 2014. V. 10(20). P. 4042-4065.
3. *Stuart S.J., Tutein A.B., Harrison J.A.* A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions // *J. Chem. Phys.* 2000. V. 112. P. 6472-6486.
4. *Elstner M., Porezag D., Jungnickel G., Elsner J., Haugk M., Frauenheim Th., Suhai S., Seifert G.* Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties // *Physical Review B*. 1998. V. 58(11). P. 7260-7268.
5. Свид. №2016612893 РФ. Многопроцессорный программно-информационный комплекс моделирования молекулярных систем для супер-ЭВМ «Mizar» / Глухова О.Е., Савостьянов Г.В. Оpubл. 11.03.2016.

ВЛИЯНИЕ КОМПОЗИТНОГО НАНОРАЗМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА СТОЙКОСТЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА К ДЕЙСТВИЮ ИЗЛУЧЕНИЙ

С.В. Стецюра, П.Г. Харитонова, И.В. Маляр
Саратовский университет имени Н.Г. Чернышевского
e-mail: stetsyurasv@mail.ru; haritonovapg@gmail.com

Поликристаллические фоточувствительные пленки микронной толщины на основе полупроводников А2В6 достаточно широко используются для создания солнечных батарей, фоторезистивных структур, а также перспективны для создания потенциометрических светоадресуемых биосенсоров. Расширение области применения таких материалов сдерживает типичный для полупроводниковых широкозонных материалов недостаток - в условиях воздействия излучением оптического диапазона повышенной интенсивности, а также γ -излучением может наблюдаться быстрая фотоутомляемость и деградация полупроводниковой структуры и, следовательно, неконтролируемый «уход» её параметров. Как было показано нами ранее, уменьшить проявление данного недостатка можно, создавая геттерные стоки радиационных дефектов. Рассмотрим эту возможность на конкретном материале, в качестве которого возьмем сульфид кадмия, наиболее изученный в этом аспекте. Ранее было показано, что стоками технологических и радиационных дефектов в CdS могут быть узкозонные включения PbS [1], либо свинецсодержащие наноразмерные области в приповерхностном слое полупроводника [2], которые приводят к образованию глубоких энергетических уровней или потенциальных ям в областях интенсивного поглощения падающего излучения и, следовательно, образованию радиационных дефектов. При этом встраивание в материал геттерных областей приводит к разупорядочиванию структуры образца, что влечет за собой снижение фоточувствительности. Поэтому актуальным является создание такой технологии получения геттерных областей, которая позволит сохранить максимальную фоточувствительность при значительном увеличении стойкости к излучениям различной природы и снижению фотоутомляемости.

Для создания радиационно-стойких структур CdS с узкозонными включениями PbS ранее применяли метод термического испарения в вакууме исходной шихты, состоящей из полупроводниковых компонентов CdS, PbS, сенсебилизирующих добавок, и отжига, описанных в работе [3]. При использовании такой технологии PbS распределяется по всему объему образца, что значительно разупорядочивает структуру полупроводникового преобразователя и приводит к уменьшению его фоточувствительности.

Исследования, проведенные методом вторично-ионной масс-спектрометрии, показали, что после сенсебилизирующего отжига образцов свинец выходит на поверхность, где и происходит основной рост и формирование фазы PbS [2,4,5] – рис.1. Поэтому предположили, что для повышения радиационной стойкости и сохранения фоточувствительности CdS свинцом достаточно модифи-

цировать только приповерхностный слой CdS, в котором происходит дефектообразование при поглощении излучения (рис.2).

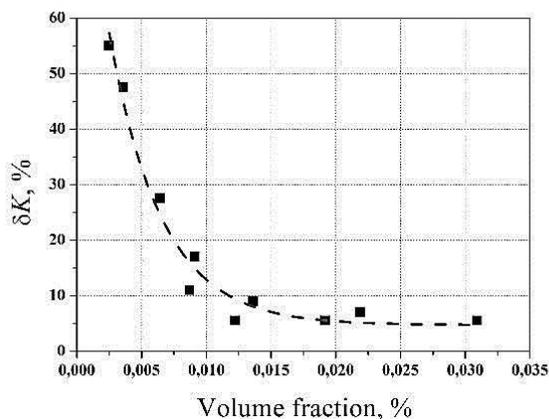


Рис. 1. Зависимость изменения потерь кратности фотоспротивления после облучения от доли объема, занимаемой преципитатами PbS в пленке CdS толщиной, определяемой ослаблением падающего излучения в е раз.

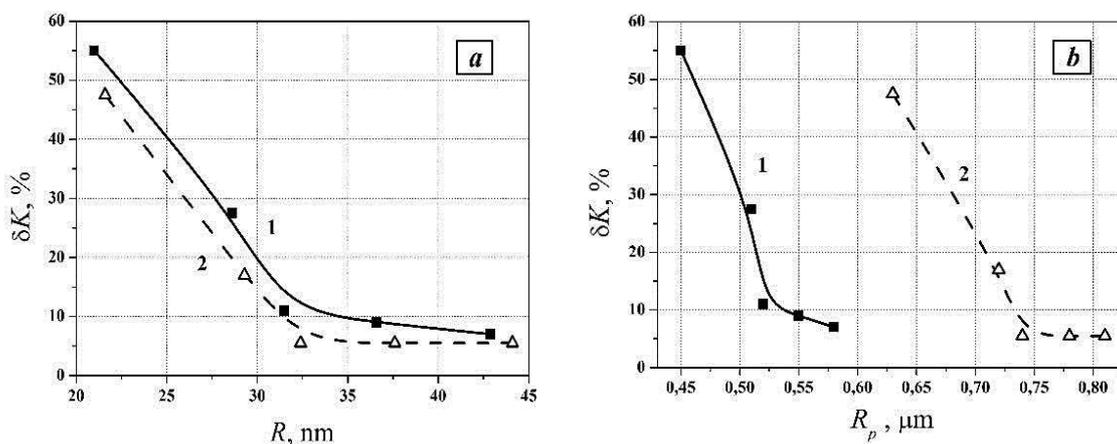


Рис. 2. Зависимость потерь кратности фотоспротивления от радиуса преципитатов на поверхности (а) и от максимальной глубины образования преципитатов (b) в пленках CdS с нанесенными слоями арахината свинца, отожженных при 545 ± 5 °C в течение 10 (1) и 20 (2) минут.

В [6] было показано, что при нанесении пленки арахината свинца на чистый CdS, можно получить гетерофазный материал CdS- PbS с повышенной радиационной стойкостью после проведения термической обработки полученной гибридной структуры. Термический отжиг привел к испарению арахиновой кислоты с поверхности CdS и диффузии Pb вглубь образца с образованием включений PbS. Для структурной организации металла в пленке, его равномерного распределения в этом методе используются поверхностно - активные вещества и метод Ленгмюра - Блоджетт.

В работе [7] был предложен способ изготовления радиационно-стойких структур без длительного высокотемпературного отжига, что исключает неконтролируемое изменение структуры CdS по всему объему и снижение фоточувствительности пленки в отличие от предыдущего метода. Перенос одного свинецсо-

держашего монослоя жирной кислоты на поверхность фоточувствительной пленки CdS осуществляют по методу Ленгмюра-Шеффера уже после процедуры термической сенсibilизации. Установлено, что оптимальные результаты получались при формировании свинецсодержащего монослоя жирной кислоты на поверхности раствора при рН раствора $8,0 \pm 0,4$. Было установлено, что при этих условиях формируются свинецсодержащие кластеры микронного и субмикронного размеров, встроенные в монослой жирной кислоты, которые равномерно распределены и занимают 40-50 процентов площади органического слоя.

Последний метод повышения радиационной стойкости и уменьшения фотоутомляемости оптимален для пленочных (до 500 нм) полупроводников, но существенным его недостатком является загрязнение поверхности органическими соединениями, не несущими функциональной нагрузки в данной структуре. Последние исследования позволили нам экспериментально установить факт образования свинецсодержащей пленки на поверхности субфазы как при наличии ПАВ на поверхности, так и без него при определенных рН среды и концентрации соли. Таким образом, устранен недостаток предыдущего метода при сохранении размера и поверхностной концентрации свинецсодержащих кластеров в покрытии.

Предлагаемые методы снижения последствий интенсивного излучения можно использовать и для других материалов, например, для поликристаллического кремния, на оптические и электрофизические параметры которого также существенное влияние оказывает интенсивное высокоэнергетическое излучение. В этом случае области узкозонных включений будут создаваться на основе других химических соединений при соблюдении вышеуказанных технологических принципов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00524-а).

Библиографический список

1. *Роках А.Г.* Варизонная модель полупроводника, стойкого к деградации // Письма в ЖТФ. 1984. Т.10, №13. С.820-823.
2. *Маляр И.В., Стецюра С.В.* Влияние морфологии и состава фаз поверхности на радиационную стойкость гетерофазного материала CdS-PbS // ФТП. 2011. Т.45, В.7. С.916-922.
3. Пат. 845685 РФ МПК H01L21/30. Состав для изготовления пленочных фоторезисторов / Роках А.Г., Кумаков А.В., Елагина Н.В. Оpubл. 20.05.1995. Бюл. №36.
4. *Стецюра С.В., Маляр И.В., Сердобинцев А.А., Климова С.А.* Влияние параметров узкозонных включений на тип и величину вторично-ионного фотоэффекта в гетерофазных фотопроводниках // ФТП. 2009. Т.43, В.8. С.1102-1108.
5. Пат. RU 2328059 C1 МПК H01L 31/18. Способ изготовления фотопроводящих радиационно-стойких пленок / Стецюра С.В., Глуховской Е.Г., Сердобинцев А.А., Маляр И.В. Оpubл. 27.06.08. Бюл. № 18.
6. *Стецюра С.В., Глуховской Е.Г., Козловский А.В., Маляр И.В.* Создание ультратонкого источника примеси для снижения радиационных потерь фоточувствительных пленок CdS // ЖТФ. 2015. Т.85, В.5. С.116-122.
7. Пат. RU 2546119 C2 МПК H01L31/18. Способ изготовления фотопроводящих радиационно-стойких структур / Стецюра С.В., Климова С.А. Оpubл. 10.04.2015. Бюл. № 10.

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*И.А. Оносов¹, А.О. Пишкинас¹, С.А. Корчагин¹, С.П. Романчук¹,
Е.М. Ревзина², Д.В. Терин²*

¹Саратовский государственный технический университет им.Гагарина Ю.А.

²Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: romanchuk_sergey@bk.ru

Исследования взаимодействия электромагнитного излучения с нанокompозитными средами является одной из важнейших задач современной физики. Это обусловлено тем, что нанокompозитные среды составляют основу для создания новых функциональных материалов с требуемыми характеристиками. Свойства таких материалов зависят от морфологии и состава. Подбирая материал частиц включений и матрицы, а также форму, размеры и ориентацию частиц, можно проектировать среды с необходимыми характеристиками [1]. В связи с этим, математическое моделирование и компьютерный анализ данных становится наиболее оптимальным подходом при исследовании характеристик нанокompозитных сред.

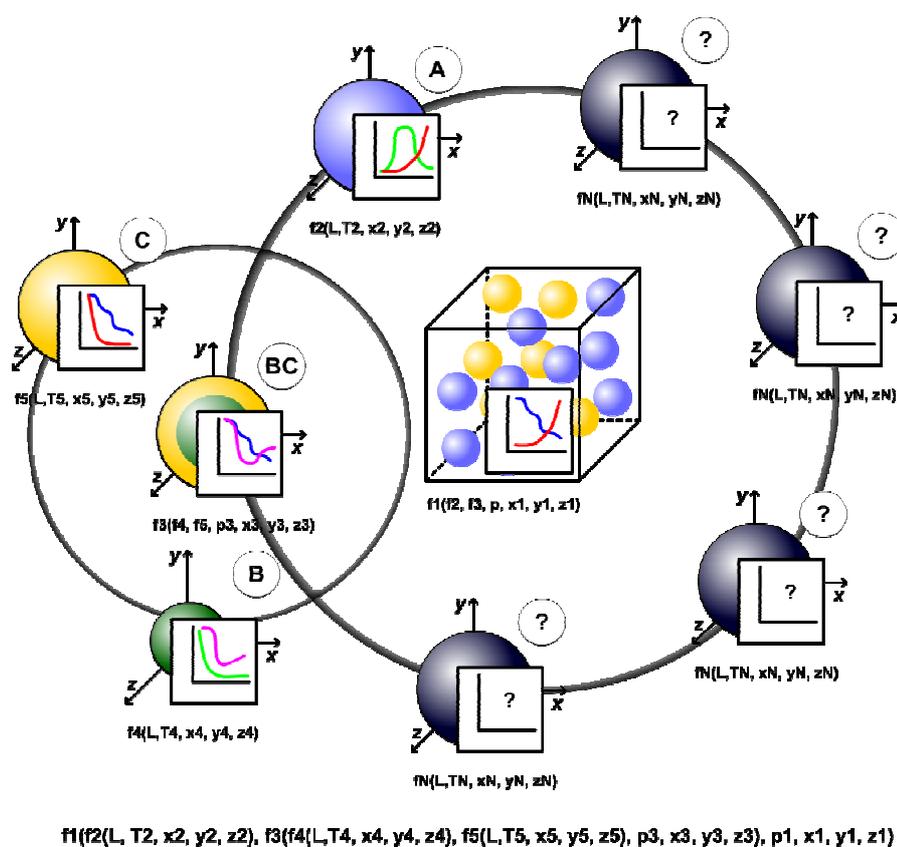


Рис. 1. Схематичное отображение многофакторной зависимости свойств композитного материала

При создании новых функциональных материалов особую роль играют программные инструменты математического моделирования. Такие программные комплексы позволяют ещё на стадии проектирования провести ряд численных экспериментов по подбору оптимальной морфологии материала. В текущее время ощущается недостаток в инструментах для проведения численного экспресс-анализа электродинамических свойств композитных сред. Для широкого применения программных комплексов такого рода при разработке необходимо учесть следующие требования: широкий спектр функциональности, многообразие экспорта и импорта данных, по возможности низкие системные требования, а также простой в освоении визуальный интерфейс [2].

Авторами разработан специализированный программный комплекс для математического моделирования электродинамических свойств композиционных материалов на основе моделей эффективной среды [3], который позволяет исследовать зависимость диэлектрической проницаемости гетерогенной среды от различных факторов (рис.1). Программный комплекс позволяет проводить исследования на основе ряда моделей для матричных и статистических сред, с включениями в форме сфер и сфероидов, и неоднородными частицами включений [4, 5, 6]. Анализ свойств проводится исходя из введенных в систему данных о параметрах среды: объемные доли компонент, комплексная диэлектрическая проницаемость веществ, форма, структура и ориентация в пространстве частиц включений [2].

В разработанном программном комплексе зависимость комплексной диэлектрической проницаемости нанокompозитного материала строится на основе моделей Релея, Лоренц-Лоренца, Лоренц-Лоренца-Клаузиуса-Моссоти, Лихтенкера, Бетчера, Максвелла, Максвелла-Гарнетта, Максвелла-Гарнетта-Силларса, Бруггемана, Бруггемана-Оделевского, Паули и Швана. Программный комплекс содержит расширяемый модуль численных методов для использования наиболее оптимальных подходов решения задач. Для поиска корней полиномиальных уравнений с комплексными переменными модуль численных методов содержит специально программно-реализованные методы Аберта-Эрлиха и Дюрана-Кернера [7].

Использование разработанного программного инструментария позволило провести ряд численных исследований частотной зависимости диэлектрической проницаемости смеси SiO с включениями частиц Ag, Au, Cu при различной объемной доле включений, зависимости диэлектрической проницаемости от формы частиц смеси Al₂O₃ с включениями Au [2]. В рамках теории эффективной среды разработаны математические модели и модуль программного комплекса для исследования фрактальных нанокompозитных структур [8].

Библиографический список

1. *Виноградов А. П., Дорофеев А. В., Зухди С. К* вопросу об эффективных параметрах метаматериалов//УФН. 2008. Т. 178, № 5. С. 511-518.

2. *Пишкинас А.О., Оносов И.А., Корчагин С.А., Романчук С.П., Терин Д.В.* Разработка программных средств моделирования композитных наноматериалов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2015. Т. 2, № 11. С. 301-305.
3. Свидетельство № 2014615533 РФ, Программный комплекс "Математическое моделирование и многокритериальный анализ нелинейных свойств композиционных материалов на основе моделей эффективной среды": Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / *Романчук С.П., Терин Д.В.*; заявитель и патентообладатель Романчук Сергей Петрович, Терин Денис Владимирович. № 2014612918/69 ; заявл. 02.04.2014 ; зарегистрир. 28.05.2014.
4. *Корчагин С.А., Терин Д.В., Романчук С.П.* Синергетика математических моделей для анализа композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т. 23, № 3. С. 55-65.
5. *Клинаев Ю.В., Романчук С.П., Терин Д.В.* Математическое моделирование средств анализа и контроля сред, содержащих сферические наночастицы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 12. С. 92.
6. *Корчагин С.А., Клинаев Ю.В., Терин Д.В., Романчук С.П.* Моделирование электродинамических свойств композитных сред // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. № 3 (80). С. 46-53.
7. *Романчук С.П., Терин Д.В., Шатурная О.С.* Исследование численных схем одновременного поиска корней полиномов с комплексными коэффициентами применительно к моделям эффективной среды // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. № 4 (73). С. 181-188.
8. *Корчагин С.А., Клинаев Ю.В., Терин Д.В., Романчук С.П.* Вычислительный эксперимент с моделями фрактальных нанокompозитных структур // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. № 3 (80). С. 31-38.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАФЕН-ФУЛЛЕРЕНОВОГО ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА В ЭЛЕКТРОНИКЕ

О.Е. Глухова, В.В. Митрофанов, М.М. Слепченков

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: slepchenkvm@mail.ru

В настоящее время представители класса углеродных наноструктур – графен, нанотрубки, фуллерены – являются перспективными материалами, определяющими траекторию развития производства в наукоемких отраслях. Композитные материалы на основе углеродных наноструктур также обладают большим потенциалом для практического применения. В частности, композиты на основе графена и углеродных нанотрубок находят свое применение в качестве элементной базы нового поколения электронных устройств [1]. Одной из последних тенденций в развитии данного направления материаловедения является разработка нового углеродного композитного материала на основе графена и молекулы фуллерена [2]. Этот композитный материал был уже

экспериментально получен путем электрофоретического осаждения [3]. В настоящее время проводятся интенсивные исследования в области изучения свойств комплекса графен+фуллерен и поиска их прикладного применения. В частности, молекулы фуллеренов и их производные уже находят своё применение в качестве элементной базы таких устройств, как полевые транзисторы [4] и солнечные батареи [5]. Для расширения границ применимости новых углеродных композитных структур в электронике, в частности, для разработки на их основе наноприборов, необходимо обладать знаниями об электронных свойствах материала и об эффективных способах управления ими. Целью данной работы является изучение закономерностей изменения электронной структуры нового гибридного материала на основе графена и фуллерена C_{60} (рис. 1) от топологии графенового листа.

Математическая модель исследуемого композитного материала графен+ C_{60} была построена на основе модели SCC DFTB, предложенной в работе [6]. Данная модель позволяет учитывать транспорт заряда между атомами в ходе исследуемого процесса. В качестве инструмента исследования использовался программный пакет KVAZAR [7].

В работе рассматривались несколько типов графеновой топологии, а именно - графен, содержащий дефект поворота связи, и графен, функционализированный атомами водорода. Для каждого варианта топологии графена рассчитывалась зонная структура и плотность электронных состояний комплекса графен+ C_{60} . Исследовалась чувствительность рассматриваемых гибридных углеродных структур к концентрации структурных дефектов. В результате анализа полученных результатов численного моделирования было выявлено влияние топологии графена на электронную структуру графен-фуллеренового комплекса.

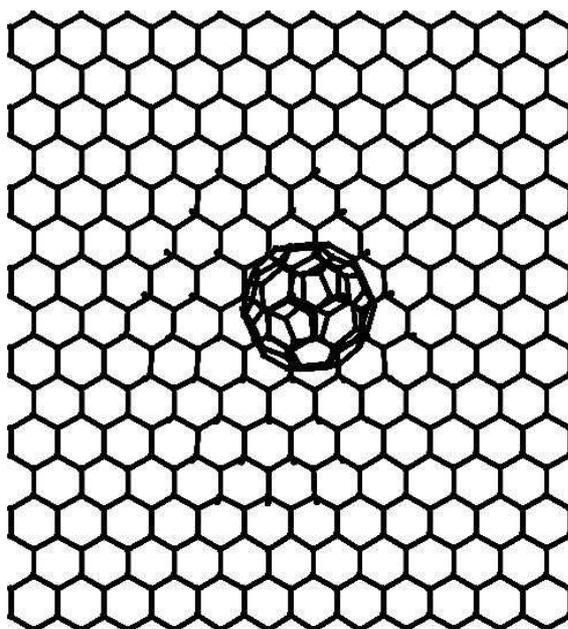


Рис. 1. Молекулярный комплекс графен- C_{60}

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ-офи_м №15-29-01025, РФФИ-а №15-07-06307 и стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-3135.2016.1.

Библиографический список

1. *Kang J.W., Lee K.W.* Molecular dynamics study of carbon-nanotube shuttle-memory on graphene nanoribbon array // *Computational Materials Science*. 2014. V. 93. P.164-168.
2. *Koh W., Moon H.S., Lee S.G., Choi J.I., Jang S.S.* A First-Principles Study of Lithium Adsorption on a Graphene–Fullerene Nanohybrid System // *ChemPhysChem*. 2015. V. 16, I. 4. P. 789-795.
3. *Gan T., Hu C., Sun Z., Hu S.* Facile synthesis of water-soluble fullerene–graphene oxide composites for electrodeposition of phosphotungstic acid-based electrocatalysts // *Electrochimica Acta*. 2013. V.111. P. 738-745.
4. *Wang R., Wang S., Wang X., Meyer J.A.S., Hedegård P., Laursen B.W., Cheng Z., Qiu X.* Charge Transfer and Current Fluctuations in Single Layer Graphene Transistors Modified by Self-Assembled C₆₀ Adlayers // *Small*. 2013. V. 9(14). P. 2420-2426.
5. *Jeong Y.J., Yun D.J., Jang J., Park S., An T.K., Kim L.H., Kim S.H., Park C.E.* Solution-processed n-type fullerene field-effect transistors prepared using CVD-grown graphene electrodes: improving performance with thermal annealing // *Phys Chem Chem Phys*. 2015. V. 17(9). P. 6635-6643.
6. *Elstner M., Porezag D., Jungnickel G., Elsner J., Haugk M., Frauenheim Th., Suhai S., Seifert G.* Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties // *Physical Review B*. 1998. V. 58(11). P. 7260-7268.
7. *Глухова О.Е., Колесникова А.С., Савостьянов Г.В., Слепченков М.М.* ПО «KVAZAR» - платформа для прогностического моделирования в области нано- и биомедицинских технологий. - Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2015. 247 с.

2. ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ С ПЛАЗМЕННЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

М.С. Усачёнок, Л.В. Симончик
Институт физики НАН Беларуси
E-mail: m.usachonak@dragon.bas-net.by

В течение последнего десятилетия наблюдается повышенный интерес к перестраиваемым устройствам СВЧ для применения в телекоммуникационных системах [1]. Для создания скоростных перестраиваемых устройств СВЧ на основе электромагнитных кристаллов (ЭК) необходимо использовать элементы из материалов, свойства которых меняются под воздействием внешних электрических (магнитных) полей. Такого рода элементом может выступить плазма благодаря своей изменчивости по размеру, плотности и геометрии при изменении разрядного тока [2]. В [3, 4] представлены одномерный плазменный ЭК, сформированный положительными столбами разрядов при пониженном давлении в волноводе, и двумерный ЭК из медных стержней с плазменным дефектом в основании, обладающие полосовыми спектрами пропускания в диапазоне 7-12 ГГц. В данной работе представлены результаты исследования ЭК, в которых роль управляющих неоднородностей выполняли плазменные столбы импульсных разрядов при атмосферном давлении.

В качестве одномерного ЭК использована периодическая структура [3], образованная тремя плазменными неоднородностями, размещенными через 38 мм перпендикулярно широким стенкам волновода сечением $23 \times 10 \text{ см}^2$ (Рис. 1, *a*). Плазменные неоднородности – плазменные столбы импульсных разрядов в кварцевых трубках в потоке аргона (1 л/мин) при атмосферном давлении. Внешний диаметр трубок 4,0 мм и внутренний – 1,6 мм. Межэлектродное расстояние – 10 мм. Длительность разряда составляла около 230 мкс (Рис. 1, *a*), максимальный ток, приходящийся на 15-20 мкс, – 11 А.

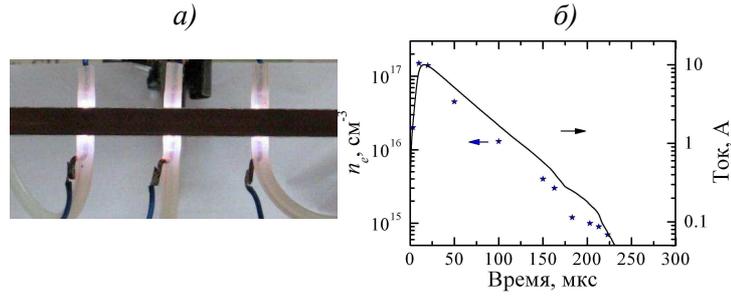


Рис. 1. (а) Фотография волноводной секции с тремя разрядами и (б) импульс тока и временная зависимость концентрации электронов в плазменных

Оценка плотности электронов в плазме разряда была выполнена по штарковскому уширению линии водорода H_{\square} [5]. В условиях эксперимента аппаратное уширение составляло 0,045 нм, доплеровское - менее 0,035 нм, ван-дер-ваальсовское – менее 0,004 нм и штарковское в максимуме тока разряда – более 1 нм. Зависимость n_e от времени представлена на Рис. 1, б.

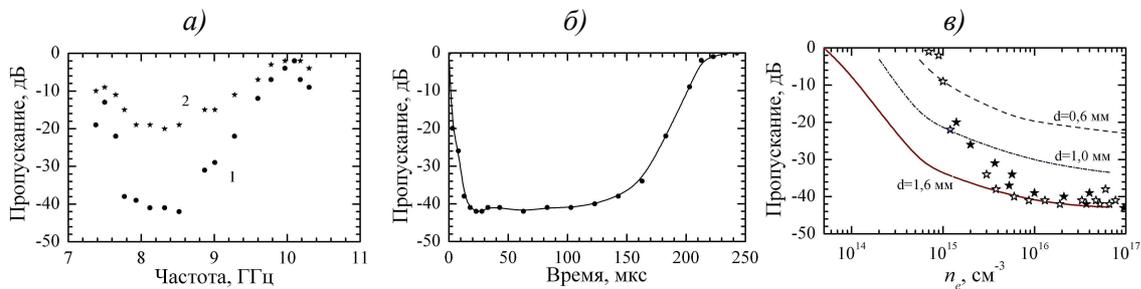


Рис. 2. (а) Спектры пропускания плазменного ЭК на 1 - 50-55 мкс и на 2 - 195-200 мкс разряда, зависимость его пропускания от времени (б) и от концентрации электронов в плазменных неоднородностях(в) на частоте 8,3 ГГц

Плазменная периодическая структура обладает полосовым спектром пропускания (Рис. 2, а). На 50-55 мкс разряда подавление в запрещенной зоне (7,9 ГГц-8,9 ГГц) составляет более 40 дБ и в полосе пропускания менее 5 дБ. Такой уровень заграждения сохраняется примерно до 150 мкс (Рис. 2,б).

Зависимость пропускания на частоте 8,3 ГГц от плотности электронов представлена звездочками на рисунке 2, в. Сопоставление экспериментальных результатов с результатами моделирования, выполненного в среде программы AnsoftHFSS, демонстрирует хорошее согласие при концентрациях электронов более $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и расхождение при меньших n_e , что может быть объяснено контракцией плазменного столба. Полученная зависимость демонстрирует возможность управления спектром пропускания ЭК при изменении n_e от 0 до 10^{16} см^{-3} . Исследовано пропускание мощного СВЧ импульса (50 кВт, длительность около 200 нс) через волноводную секцию с плазменным ЭК.

Исследовано также прохождение мощного СВЧ импульса через треугольный двумерный кристалл [4], образованный медными стержнями, расположенными параллельно друг другу и вектору E падающей СВЧ волны с шагом 22 мм вдоль луча падающего излучения и перпендикулярно ему в H -плоскости. Падающее излучение проходит через такой ЭК в направлениях 45° при наличии дефектов в первом со стороны генератора ряду стержней. Применение в каче-

стве дефекта двумерного электромагнитного кристалла импульсного разряда при атмосферном давлении в аргоне (поток – 1-2 л/мин, межэлектродный промежуток – 5,5 см) позволяет контролируемо управлять диаграммой направленности кристалла при мощности СВЧ излучения до десятков киловатт (Рис. 3). Максимум тока в разряде составляет около 23 А ($n_e \approx 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – оценка по полуширине контура линии H_α) и приходится на 22-ю микросекунду относительно начала разряда. К 300-ой микросекунде разряд прекращается.

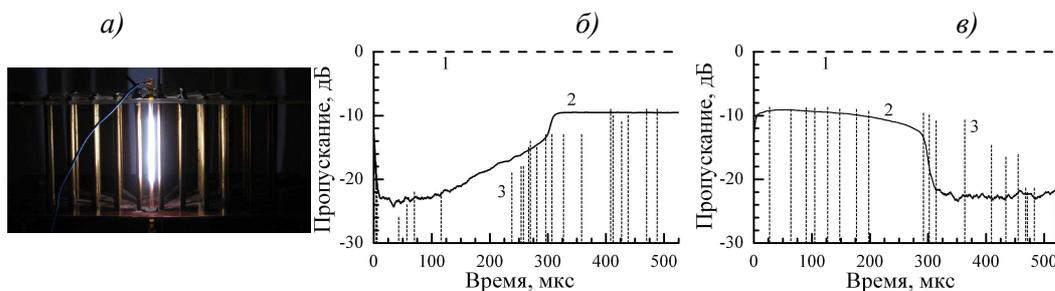


Рис. 3. (а) Фотография двумерного ЭК с плазменной неоднородностью и временные зависимости его пропускания в случаях (б) плазма – компенсатор дефекта и (в) плазма – дополнительный дефект при 5 мВт (2) и 50 кВт (3) в направлении 45° (1 – уровень падающего излучения)

Изменение пропускания электромагнитного кристалла (Рис. 3, б и в) для обоих типов дефектов (плазменный столб – компенсатор дефекта или дополнительный дефект) при киловаттной мощности СВЧ излучения максимально (на 14 ± 2 дБ) в фазе разряда, когда концентрация электронов больше 10^{16} см^{-3} (с 5 мкс до 100 мкс), и нивелируется к 400 мкс, что несколько позже, чем закачивается разряд (кривые 3 на Рис. 3, б и в). По-видимому, это связано с поддержанием разряда за счет столкновительного поглощения мощного СВЧ излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ-CNRS (Ф15Ф-004).

Библиографический список

1. Банков С.Е. *Электромагнитные кристаллы*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 352 с.
2. Sakai O., Tachibana K. Plasma as metamaterials: a review // *Plasma Sources Sci. Techn.* 2012. V. 21(1). 013001. 18 p.
3. Arkhipenko V.I., Callegari Th., Simonchik L.V., Sokoloff J., Usachonak M.S. One-dimensional electromagnetic band gap structures formed by discharge plasmas in a waveguide // *Journal of applied physics*. 2014. V. 116(12). 123302. 11 p.
4. Simonchik L.V., Usachonak M.S. 2D electromagnetic band gap structure controlled by plasma // *Proceedings of the 41th EPS Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, 23–27 June 2014*. URL: <http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/P2.126.pdf>. Обращение к ресурсу 01.10.2015.
5. Грим Г. *Спектроскопия плазмы*. – М.: Атомиздат, 1969. 452 с.

ДИСКРЕТНАЯ ДИФРАКЦИЯ В МАССИВЕ МАГНИТНЫХ ВОЛНОВОДОВ

А.А. Грачев, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин

Саратовский Государственный Университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: stig133@gmail.com

Системы латерально связанных волноведущих структур на основе тонких пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, интерферометров, мультиплексоров, фильтров и ответвителей [1]. Перестройка рабочих частот таких устройств внешним магнитным полем и путем изменения коэффициента связи между ферритовыми волноводами, разнообразие типов дисперсии и характера связи распространяющихся спиновых волн (СВ), проявление различных нелинейных эффектов (солитонное распространение волн, автомодуляция) позволяют изменять их характеристики и режимы работы в широких пределах.

В данной работе проведено исследование процессов дискретной дифракции поверхностных и обратных объёмных СВ в системе латерально связанных ферритовых волноводов численными методами и методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии [2]. Схематически структура представлена на рисунке 1:

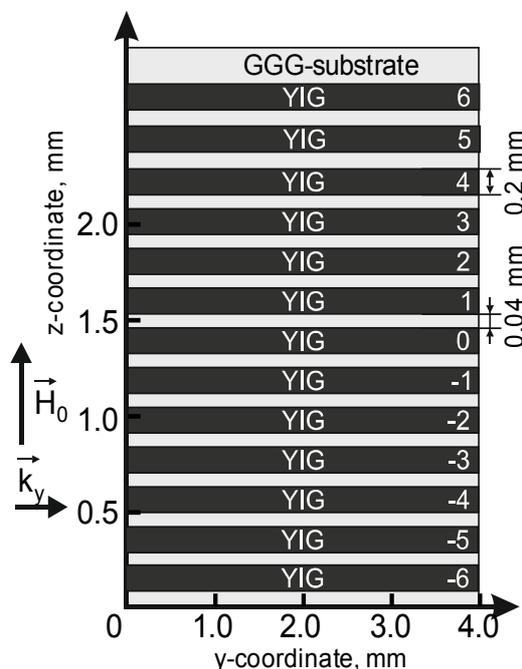


Рис. 1. Схема рассматриваемой структуры

Численное моделирование производилось на анализе решений дискретного нелинейного уравнения Шрёдингера (ДНУШ). Показано, что полученные дифракционные картины существенным образом зависят от частоты и ампли-

туда входного сигнала возбуждаемого в волноводах с $n = -2, -1, 0, 1$ и 2 . Видно, что с ростом частоты увеличивается длина перекачки в волноводах и, следовательно, режим дифракции сменяется на рефракцию пучка магнитостатических волн (МСВ) и далее наблюдается режим, когда пучок идёт одновременно по пяти волноводам (Рис. 2). Также видно, что при увеличении амплитуды входного сигнала на динамику распространения спиновых волн начинает влиять нелинейность, приводящая к формированию дискретного солитона в такой структуре.

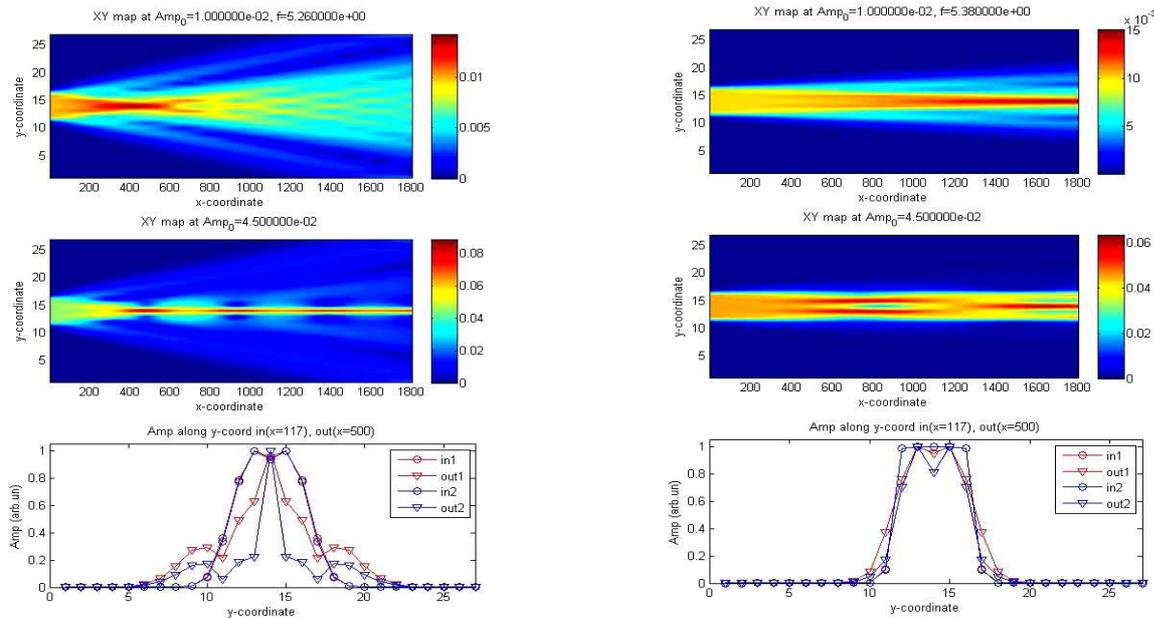


Рис. 2. Распространение пучка МСВ в рассматриваемой структуре

Методом конечных элементов и конечных разностей во временной области проведен расчет электродинамических характеристик, определен спектр и построены распределения полей и дисперсионные характеристики волноводных мод такой структуры при возбуждении в ней поверхностной СВ. Результаты численного моделирования находятся в хорошем соответствии с данными экспериментального исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (16-37-60093, 16-37-00217, 16-02-00789) и стипендии (СП-313.2015.5) и гранта (МК-5837.2016.9) Президента РФ.

Библиографический список

1. Lenk B., Ulrichs H., Garbs F., Münzenberg M. The building blocks of magnonics // Phys. Rep. 2011. V. 507. P. 107-136.
2. Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N. Brillouin light scattering studies of confined spin waves: linear and nonlinear confinement // Phys. Rep. 2001. V. 348. P. 441-489.
3. Lederer F., Stegeman G., Christodoulides D., Assanto G. Discrete solitons in optics // Phys. Rep. 2008. V. 463. P. 1-126.

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ

С.А. Корчагин, Д.В. Терин¹, О.Ю. Кондратьева¹, С.П. Романчук
Саратовский государственный технический университет им.Гагарина Ю.А.
¹Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: korchaginser@gmail.com

В настоящей работе исследуются электродинамические свойства композитов многомасштабной слоистой структуры, в которой каждый последующий структурный уровень содержит предыдущий уровень, начиная с наименьшего (рис. 1). Свойства композитов с таким строением вызывают интерес в связи с изучением некоторых объектов, существующих в естественных условиях, а также в связи с разработкой композитов в электротехнике, механике и теплофизике [1].

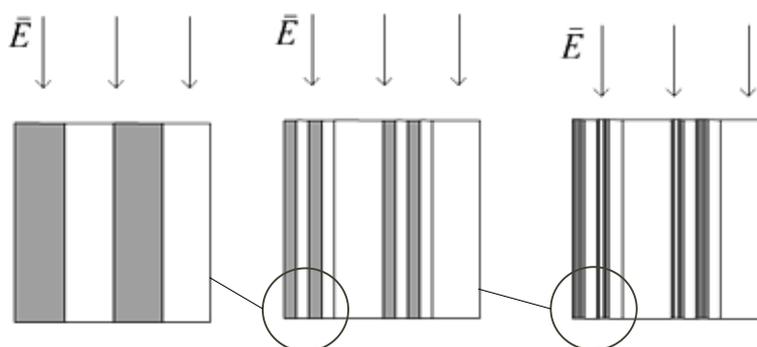


Рис. 1. Многомасштабная слоистая структура композита

На основе теории эффективной среды разработаны математические модели композита слоистой структуры, позволяющие определять его электродинамические свойства. Проведено компьютерное моделирование, изучены частотные зависимости диэлектрической проницаемости композитных сред, состоящих из периодически чередующихся слоев с различной толщиной и свойствами. Набор кластеров, образующих дисперсную систему, рассматривается как некая новая среда, обладающая тем же уровнем поляризации. Таким образом, зная параметры каждого из компонентов композита, их геометрическую форму и концентрацию можно определить характеристики гетерогенной среды, как целого. Слоистая структура композитного материала приводит к образованию поверхностей раздела, отделяющих области с различными электрическими свойствами. При воздействии электрического поля на неоднородные вещества, свободные ионы, находящиеся в проводящих или полупроводящих слоях, начинают перемещаться в пределах каждого слоя, который приобретает индуцированный дипольный момент. Неоднородность структуры материала приводит

к ограниченному перемещению зарядов, которые, являясь свободными, в пределах одной частицы, по отношению ко всему объему образца оказываются связанными. Для электродинамических характеристик таких материалов, в рамках теории эффективной среды, как правило, пользуются, так называемыми, эффективными параметрами, выражающими соотношения между средней напряженностью поля такой среды, и средней плотностью тока. Делать выводы о влиянии параметров различных сопоставляющих структур материала, можно только в том случае, если известна связь между параметрами составляющих и эффективными параметрами среды.

Для слоистых систем, многомасштабной структуры, авторами предложены математические модели. В случае поля, направленного вдоль слоев:

$$\varepsilon_{eff} = (d_1^2 + 2d_1d_2\varepsilon_2 + d_2^2\varepsilon_2)/(d_1 + d_2)^2, \quad \varepsilon_{eff} = (d_1^3\varepsilon_1 + d_1^2d_2\varepsilon_2 + 3d_1d_2^2\varepsilon_2 + d_2^3\varepsilon_2)/(d_1 + d_2)^3.$$

Для поля, направленного поперек слоев:

$$\varepsilon_{eff} = [(d_1 + d_2)^2\varepsilon_1\varepsilon_2]/[2d_1d_2\varepsilon_1 + d_2^2\varepsilon_1 + d_1^2\varepsilon_2], \quad \varepsilon_{eff} = (d_1 + d_2)^3\varepsilon_1\varepsilon_2^2 / (d_2^3\varepsilon_1^2 + 3d_1^2d_2\varepsilon_1\varepsilon_2 + d_1^3\varepsilon_2^2).$$

Где ε_{eff} - комплексная диэлектрическая проницаемость, d_1 и d_2 - толщины слоев. Для простейших двухслойных систем $\varepsilon_{eff} = (\varepsilon_1d_1 + \varepsilon_2d_2)/(d_1 + d_2)$ - поле направлено вдоль слоев. Откуда $\varepsilon'_{eff} = (\varepsilon'_1d_1 + \varepsilon'_2d_2)/(d_1 + d_2)$ и $\varepsilon''_{eff} = (\varepsilon''_1d_1 + \varepsilon''_2d_2)/(d_1 + d_2)$. Для поля, направленного поперек слоев: $\varepsilon_{eff} = (\varepsilon_1\varepsilon_2(d_1 + d_2))/(\varepsilon_2d_1 + \varepsilon_1d_2)$, $\varepsilon'_{eff} = \frac{[\varepsilon'_1d_1(\varepsilon_2'^2 + \varepsilon_2''^2) + \varepsilon_2''d_2(\varepsilon_1'^2 + \varepsilon_1''^2)](d_1 + d_2)}{(\varepsilon_2'd_1 + \varepsilon_1'd_1)^2 + (\varepsilon_2''d_2 + \varepsilon_1''d_2)^2}$ $\varepsilon''_{eff} = \frac{[\varepsilon''_1d_1(\varepsilon_2'^2 + \varepsilon_2''^2) + \varepsilon_2'd_2(\varepsilon_1'^2 + \varepsilon_1''^2)](d_1 + d_2)}{(\varepsilon_2'd_1 + \varepsilon_1'd_1)^2 + (\varepsilon_2''d_2 + \varepsilon_1''d_2)^2}$.

На основе приведенных моделей, авторами разработан программный комплекс [2], позволяющий прогнозировать электродинамические характеристики композита в зависимости от длины волны внешнего воздействия и количественного соотношения компонент, из которых состоит композит. На рис. 3 приведены результаты компьютерного моделирования зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости от толщины слоев.

Соотношения компонент, образующих композит качественно влияют на эффективную диэлектрическую проницаемость. Полученные данные позволяют наблюдать, что с увеличением структурного уровня слоистая система оказывает все меньшее влияние на изменение электродинамических свойств композита. Исследование приведенных в работе моделей теоретическим и расчетным путем позволяет определить условия проявления различных электродинамических эффектов и процессов, происходящих в композитах на микроструктурных уровнях, что может способствовать решению задач рационального проектирования новых материалов с заданными свойствами.

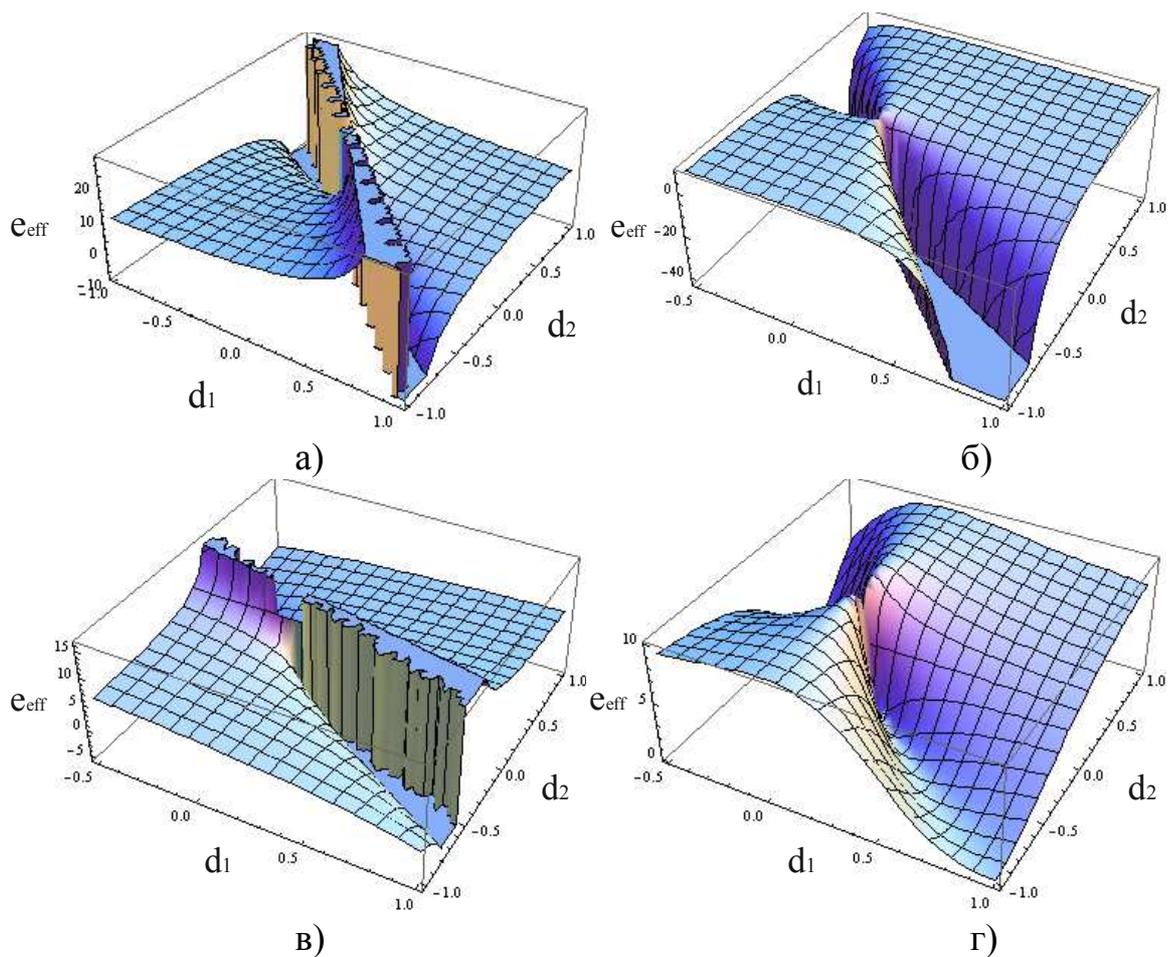


Рис. 2. Зависимости эффективной диэлектрической проницаемости от толщины слоев. а), б) – структура второго уровня, поле направлено вдоль и поперек слоям соответственно; в), г) – структура третьего уровня, поле направлено вдоль и поперек слоям соответственно

Библиографический список

1. *Емец Ю.П.* Эффективная диэлектрическая проницаемость трехкомпонентных композиционных материалов с анизотропной структурой // Журнал технической физики. 2005. Т.75. В. 2. С.67-72.
2. *Оносов И.А., Пишкихина А.О., Корчагин С.А., Романчук С.П., Терин Д.В.* Комплекс программ для проведения исследований композитных сред различной структуры // Математическое моделирование и информационные технологии в научных исследованиях и образовании. Сборник научных статей. Саратов, 2015. С. 86-89.

ВЛИЯНИЕ МЕТАСРЕДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕНН

В.И. Демидчик, Р.В. Корнев

Белорусский государственный университет

E-mail: demidvi@bsu.by

В последнее время растет интерес к применению метаматериалов в различных радиотехнических устройствах. В частности, в антенной технике метаматериалы применяются для: достижения узкой пространственной направленности излучателей, уменьшения взаимного влияния между элементами антенных решеток, управления характеристиками излучения.

К примеру, в [1] в качестве подложки плоских спиральных антенн предлагается метаматериал в виде концентрически расположенных трех слоев дисков. Применение подобной подложки позволяет уменьшить высоту антенны соответственно при сохранении характеристик излучения.

Актуальной является и общая задача излучения электромагнитных волн антеннами, расположенными в различных естественных и искусственных метасредах. Одним из вариантов метасреды является киральная среда. Особый интерес к исследованиям электромагнитных свойств киральных структур связан, главным образом, с возможностью их использования в микроволновой технике. Известно, что киральность приводит к увеличению поглощения и уменьшению уровня прямого и обратного рассеяния электромагнитных волн по сравнению с некиральной средой.

Проблема излучения электромагнитных волн в киральной среде в известной литературе освещена слабо. В основном, рассмотрены лишь вопросы излучения элементарных источников [2-3] и прямолинейных вибраторных антенн [4], расположенных в киральной среде.

В работе, на примере плоской спиральной антенны, проведен анализ особенностей излучения тонкопроволочных структур произвольной геометрии, расположенных в биизотропной киральной среде.

Известно, что электромагнитное поле в киральной среде, описываемой уравнениями

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} + i\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \vec{H}, \quad \vec{B} = -i\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \vec{E} + \mu \vec{H}, \quad (1)$$

определяется в виде суперпозиции полей [2]:

$$\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_L, \quad \vec{H} = i\eta^{-1} (\vec{E}_R - \vec{E}_L), \quad (2)$$

где ε , μ , κ – материальные параметры среды, \vec{E}_R и \vec{E}_L – вектора напряженности электрического поля волн правой и левой круговой поляризации,

$\eta = \eta_0 \sqrt{\mu/\varepsilon}$, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ – характеристический импеданс среды.

Если в безграничной киральной среде, описываемой материальными уравнениями (1) находятся источники тока с объемной плотностью \vec{j} , то используя соотношения (2) из уравнений Максвелла можно получить несвязанные неоднородные дифференциальные уравнения второго порядка [3-4]:

$$\nabla^2 \vec{E}_R + k_R^2 \vec{E}_R = \frac{i\eta}{2} \left[\frac{\nabla \operatorname{div} \vec{j}}{k_R} + k_R \vec{j} + \operatorname{rot} \vec{j} \right], \quad \nabla^2 \vec{E}_L + k_L^2 \vec{E}_L = \frac{i\eta}{2} \left[\frac{\nabla \operatorname{div} \vec{j}}{k_L} + k_L \vec{j} - \operatorname{rot} \vec{j} \right]. \quad (3)$$

Для излучателей из электрически тонких криволинейных проводников с плавно меняющейся геометрией, решение (3) принимает вид [5]:

$$\begin{aligned} \vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_L = \frac{i\eta}{2} \left\{ \int_L k_R I(l') \vec{l}' G_R dl' + \frac{1}{k_R} \nabla \int_L I(l') \frac{\partial G_R}{\partial l'} G_R dl' + \int_S [\vec{j} \times \vec{n}(s)] G_R ds' + \right. \\ \left. + \int_L k_L I(l') \vec{l}' G_L dl' + \frac{1}{k_L} \nabla \int_L I(l') \frac{\partial G_L}{\partial l'} G_L dl' - \int_S [\vec{j} \times \vec{n}(s)] G_L ds' \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

где L – длина проводника, S – площадь его боковой поверхности, \vec{l}' – единичный вектор, касательный к проводнику, $I(l')$ – осевой ток, текущий по проводнику.

Используя на поверхности идеального проводника граничное условие $E_\tau + E_i = 0$, где $E_\tau = \vec{E} \vec{l}$, в [6] получено интегральное уравнение относительно неизвестной функции токораспределения:

$$E_i = \frac{i\eta}{2} \int_L \left\{ (k_R G_R + k_L G_L) \vec{l}' \vec{l} + \left[\frac{1}{k_R} \frac{\partial^2 G_R}{\partial l' \partial l} + \frac{1}{k_L} \frac{\partial^2 G_L}{\partial l' \partial l} \right] \right\} I(l') dl', \quad (5)$$

где E_i – касательная к проводнику составляющая электрического поля источника возбуждения. $G_{L,R}$ – функция Грина в тонкопроволочном приближении для полей левой и правой поляризаций.

Для некиральной среды соотношение (5) переходит в известное уравнение Поклингтона для тонких проводников [7].

В результате решения уравнения (5) находится амплитудно-фазовое распределение тока на проводниках антенны, по которому рассчитывается поле в дальней зоне и все необходимые характеристики и параметры исследуемой антенны.

В качестве тестовых, проведены результаты расчета распределения амплитуды тока прямолинейного вибратора длиной $L/\lambda = 6$, возбуждаемого сосредоточенным источником в зависимости от параметра киральности. Характер зависимости амплитуды тока от параметра киральности соответствует аналогичным данным, полученным в [4].

Влияние киральности среды на характеристики и параметры излучателей исследовалось на примере плоской спиральной антенны Архимеда (ПСА).

В результате численного эксперимента установлено, что увеличение параметра киральности среды приводит к увеличению отраженной волны тока от концов спирали. Коэффициент направленного действия с ростом параметра ки-

ральности достигает максимума, а затем убывает. При этом, коэффициент эллиптичности излучения монотонно убывает с ростом параметра киральности.

Особенностью работы ПСА, расположенной в безграничной среде, является то, что в одно полупространство (относительно плоскости, в которой расположена спиральная антенна) излучение имеет правую поляризацию, а в другое – левую. Это приводит к разным условиям распространения поля излучения, что в свою очередь влияет на формирование диаграммы направленности. При этом, за счет киральности среды можно сформировать однонаправленное излучение ПСА в широком диапазоне частот в отличие от использования для этих целей отражающего металлического экрана.

В целом, результаты расчетов позволяют рекомендовать применение киральных метаматериалов в качестве подложки и (или) оболочки антенн эллиптической поляризации для управления их характеристиками излучения.

Библиографический список

1. *Nakun Jing, Huiling Zhao, Lihao Huang.* A novel design of planar spiral antenna with metamaterial // Progress in electromagnetic research symposium proceeding. Xi'an. March 22-26. 2010. P. 725-728.
2. *Шорохова Е.А.* Излучение элементарных источников в киральной среде // Радиотехника и электроника. 2009. Т.54. № 6. С.680-688.
3. *Фисанов В.В.* Об излучении источников в изотропной киральной среде // Известия ВУЗов. Физика. 2006. № 9. С.87-90.
4. *Iaggard D.L., Liu J.C., Grot A., Pellet P.* Radiation and scattering from thin wires in chiral media // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1992. V.40, №.11. P.1275-1281.
5. *Демидчик В.И.* Излучение произвольной системы источников в киральной среде. // Вестник Белорусского университета. Сер.1. 2013. №2. С.44-48.
6. *Демидчик В.И.* Моделирование возбуждения тонких проводников в киральной среде // Материалы 22-й международной крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо-2015). Севастополь. Вебер. 2015. Т. 2. С.493-494.
7. *Mei K.K.* On the integral equations of thin wire antennas. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1965. V.13, №5. P.374-378.

ФОТОННО - КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СВЕТОВОД В ОПТИЧЕСКОЙ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Б.А. Кузяков

Московский технологический университет (МИРЭА)

E-mail: b.a.kuzyakov@yandex.ru

В последнее время для реализации информационной связи [1, 2] между разнообразными объектами, в ряде случаев, необходимы оптические гибридные системы (ОГСИ). Они могут содержать несколько сегментов волоконно-

оптических линий связи (ВОЛС) и атмосферных открытых линий связи (АОЛС). Относительную устойчивость оптического телекоммуникационного канала, можно повысить на основе использования орбитальных угловых моментов фотонов (ОАМ) [1 - 3].

В сегментах ВОЛС, кроме хорошо изученных волокон со сплошной сердцевиной, уже используется полое волокно. Для расчета мод полого фотонно-кристаллического световода (ПФКС) могут использоваться разные методы. В работе [4] приведен расчет ПФКС, с сердцевиной в виде симметричного «шестилисткового цветка» в поперечном сечении и с дополнительными цилиндрическими отверстиями, разностным методом. В ней показано, что эффективный показатель преломления световода почти линейно убывает с ростом длины волны. Это означает, что дисперсионный параметр D , пропорциональный второй производной функции показателя преломления от длины волны $D = -(\lambda/c)(d^2 n_{\text{eff}}/d\lambda^2)$, близок к нулю. В ПФКС с заполненным сердечником зависимость дисперсионного коэффициента от длины волны не нулевая и обычно линейная [5]. Кроме того, доля энергии моды внутри сердечника ПФКС зависит от коэффициента заполнения d/Λ (d - диаметр дополнительных отверстий, Λ - расстояние между их центрами). При $d/\Lambda = 0,85$ доля энергии моды внутри сердечника достигает максимального значения.

В [6] исследован волоконный световод с сердцевиной заполненной воздухом, пропускающий моды ОАМ, с разными топологическими номерами L , с высокой эффективностью. Такие волоконные световоды позволяют пропускать моды ОАМ на расстояния свыше 1 км в диапазоне длин волн 1530-1565 нм с потерями 1,9 – 2,2 дБ/км и могут использоваться в системах оптической связи для повышения информационной емкости сигнала на фотон.

Эти выводы подтверждаются также «свежей» работой [7]. В ней показано, что превышение уровня энергии в поперечном сечении световода ПФКС, с «шестигранной» структурой заполнения световода дополнительными цилиндрическими отверстиями, в сравнении с более известным волоконным световодом, с полой сердцевиной (ПС), достигается для всех исследованных в экспериментах 24 мод ОАМ: от +1а до +6t. Анализ результатов (фрагмент) в виде разности Δ значений энергий 11 ОАМ мод (в отн. ед.) в полой сердцевине ПФКС и ПС приведен в табл. 1.

Таблица 1. Разности значений уровня энергий ОАМ мод (отн. ед.) в полой сердцевине ПФКС и ПС

Мода	+3a	-3a	+3t	-3t	+4a	-4a	+4t	-4t	+6a	-6a	-6t
Δ	8,6	9,0	9,0	8,6	9,2	9,0	8,6	11,4	5,8	17,2	15,7

Из табл. 1 видно, что величина Δ принимает различные значения для разных ОАМ мод, но везде положительна, подтверждая преимущество применения ПФКС. Наряду с этим, применение ПФКС в ОГСИ создает ряд дополнительных положительных свойств [5] всей системы.

Приведенные материалы позволяют вплотную подойти к оптимизации заданной структуры системы связи. Перспективный вариант фрагмента ОГСИ с использованием ОАМ мод приведен на рис. 1.

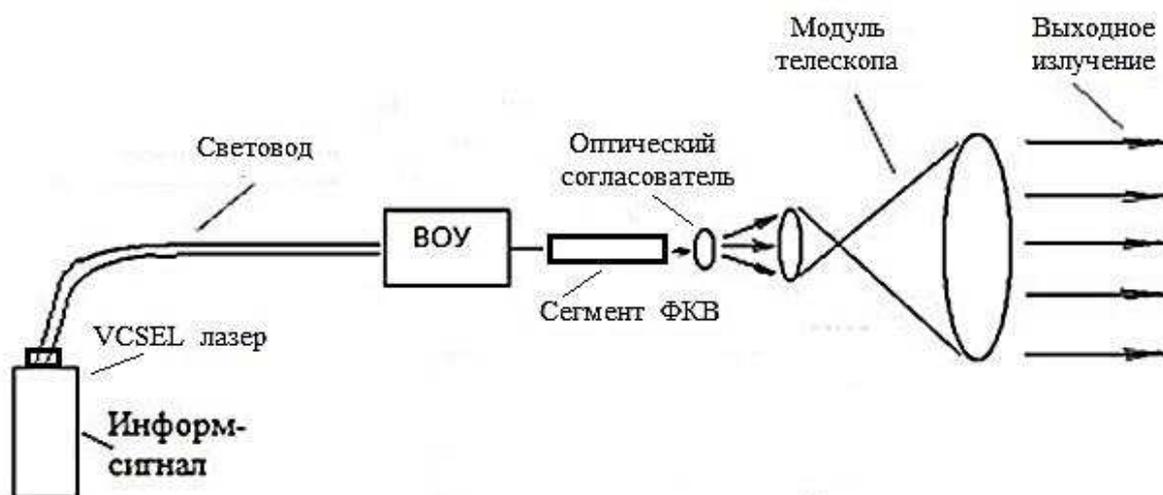


Рис. 1. Перспективный вариант фрагмента ОГСИ

Разработанный, на основе проведенного анализа современных информационных источников, вариант обобщенной оптимизированной структуры однонаправленной ОГСИ (симплекс) включает следующие модули и блоки: - модуль MVCSEL [8], на который поступает информационный сигнал, генерирующий моды ОАМ;- сегмент ВОЛС, на базе волокна, поддерживающего ОАМ моды [9];

- модуль волоконно-оптического усилителя (ВОУ) (традиционный) с коэффициентом усиления – 25 дБ;
- сегмент фотонно-кристаллического волокна (ФКВ);
- модуль передающей телескопической системы (составная часть АОЛС);
- сегмент свободной атмосферы;
- модуль приемной телескопической системы (составная часть АОЛС);
- сегмент ВОЛС на базе «полого» волокна, поддерживающего ОАМ моды;
- модуль приемника на базе pin – фотодиодов;
- блок обработки сигнала.

Таким образом, в разработанном варианте фрагмента ОГСИ с использованием ОАМ мод, применяются современные перспективные блоки, узлы и модули и оптимальный ПФКС.

Библиографический список

1. Sanchez D.J., Oesch D.W. Localization of angular momentum in optical waves propagating through turbulence // Optics Express. 2011. V. 19, I. 25. P. 25388 –25396.

2. *Gibson G., Courtial J., Padgett M. et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum // *Optics Express*. 2004. V. 12, I. 22. P. 5448 – 5456.
3. *Кузяков Б.А., Тихонов Р.В.К* проблеме повышения доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами // Труды III-й Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. - М.: НИЯУ МИФИ. 2014. С. 23 - 24.
4. *Котляр В.В., Шушупова Я.О.* Расчет мод полого фотонно-кристаллического световода разностным методом // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2007. Т. 9, № 3. С. 592-597.
5. *Соколов В.О., Плотниченко В.Г., Назарьянц В.О., Дианов Е.М.* Численное моделирование фотонно-кристаллического световода из теллуритно-вольфраматного стекла для применения в параметрических волоконных устройствах // *Квантовая электроника*. 2006. Т. 36, №1. С. 67-72.
6. *Gregg P., Kristensen P., Ramachandran S.* Conservation of orbital angular momentum in air core optical fibers. // *Optica*. 2015. V. 2, I. 3. P. 267-270.
7. *Ye J., Li Y., Han Y., Deng D., Guo Z., Gao J., Sun Q., Liu Y., Qu S.* Excitation and separation of vortex modes in twisted air-core fiber // *Optics Express*. 2016. V. 24, I. 8. P. 8310 - 8316.
8. *Li H., Phillips D.B., Wang X., Ho Y.-L.D., Chen L., Zhou X., Zhu J., Yu S., Cai X.* Orbital angular momentum vertical-cavity surface-emitting lasers // *Optica*. 2015. V. 2, I. 6. P. 547 - 552.
9. *Funes G., Vial M., Anguita J.A.* Orbital-angular-momentum crosstalk and temporal fading in a terrestrial laser link using single-mode fiber coupling // *Optics Express*. 2015. V. 23, I. 18. P. 23133 - 23142.

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОН С ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ

А.С. Пластун, А.И. Конюхов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: plastun_alex@mail.ru

Спектральная избирательность фотонно-кристаллических волокон (ФКВ) открывает большие перспективы их использования в спектроскопии. ФКВ имеют низкие потери на изгиб, хорошую пропускную способность, позволяют управлять дисперсией [1]. Одной из особенностей ФКВ является достаточно высокий уровень потерь. Для расчёта пропускания ФКВ традиционно используются методы, нацеленные на нахождение характеристик основной моды или некоторых отдельных мод [2]. При таком подходе не учитывается влияние высших мод.

В данной работе был использован метод, основанный на преобразовании Фурье для поперечного распределения полей и показателя преломления. [3] При расчёте изменения поля вдоль направления распространения использовалась "широкоугольная" схема, которая корректно учитывает фазовую задержку поля. Такой метод позволяет рассчитать полное пропускание волокна при его возбуждении лазерным пучком заданной формы. Поскольку ограничения на

форму поля отсутствуют, возможно моделирование совместного возбуждения как основной, так и высших мод волокна.

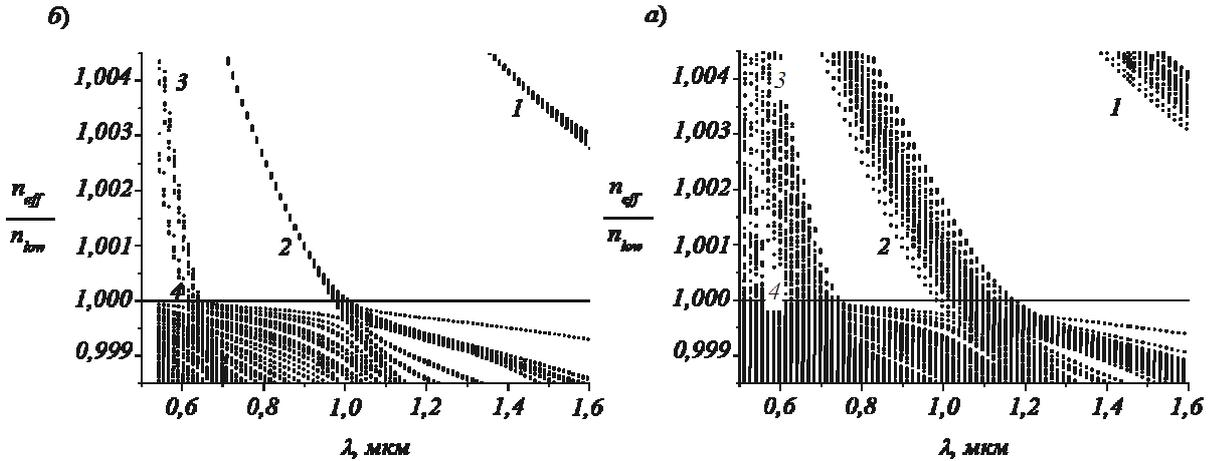


Рис.1. Дисперсионная диаграмма ФКВ: а) со структурными деформациями; б) с гексагональной решеткой. Цифры 1,2,3,4 показывают различные группы мод волокна.

На рис 1 а, б показаны дисперсионные диаграммы ФКВ. Области в диапазонах длин волн $\lambda > 1,0$ мкм, $0,67 < \lambda < 1$ мкм и λ порядка 0,65 мкм называются фотонными запрещенными зонами. Как видно из сравнения рис. 1а и рис. 1б ширина запрещённой зоны и её границы, например, на уровне $n_{\text{eff}}/n_{\text{low}}=1$ сильно зависят от наличия деформации поперечной структуры волокна. Из уравнений Максвелла [4] можно получить векторные уравнения распространения для поперечных компонент вектора магнитного поля $\mathbf{H}=(H_x, H_y, H_z)$:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{i}{2\beta} \frac{\partial}{\partial z}\right) \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{i}{2\beta} (P_{xx} H_x + P_{xy} H_y) &= 0, \\ \left(1 - \frac{i}{2\beta} \frac{\partial}{\partial z}\right) \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{i}{2\beta} (P_{yx} H_x + P_{yy} H_y) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где z – направление распространения (x, y) – поперечные координаты, β – постоянная распространения. В расчётах использовалась $\beta = k n_{\text{low}}$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, Операторы $P_{xx}, P_{xy}, P_{yx}, P_{yy}$ записываются в виде:

$$\begin{aligned} P_{xx} H_x &= \nabla_{\perp}^2 H_x + (k^2 n^2 - \beta^2) H_x - \frac{\partial \ln(n^2)}{\partial y} \frac{\partial H_x}{\partial y}, P_{xy} H_x = \frac{\partial \ln(n^2)}{\partial y} \frac{\partial H_y}{\partial x}, \\ P_{yy} H_y &= \nabla_{\perp}^2 H_y + (k^2 n^2 - \beta^2) H_y - \frac{\partial \ln(n^2)}{\partial x} \frac{\partial H_y}{\partial x}, P_{yx} H_y = \frac{\partial \ln(n^2)}{\partial x} \frac{\partial H_x}{\partial y}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $n(x, y)$ – поперечное распределение показателя преломления. Показатель преломления является комплексным. Учет производных второго порядка $(\partial^2 H_x / \partial z^2), (\partial^2 H_y / \partial z^2)$ в уравнении (2) позволяет получить правильное изменение фазового набега при распространении поля вдоль оси z . Используемый подход позволяет учесть высшие моды фотонно-кристаллической структуры при расчёте пропускания волокна. На рис. 2 показан расчет спектров пропускания и потерь ФКВ с правильной гексагональной структурой и ФКВ с дефектами. Из

рис 3 видно, что при учете высших мод полоса пропускания (сплошная линия) сужается.

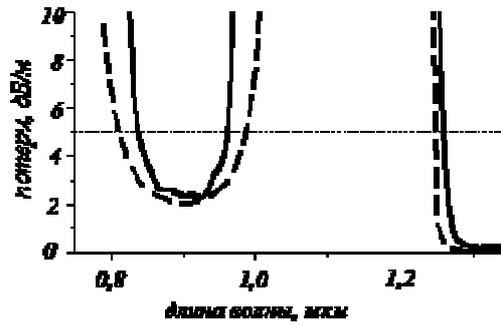


Рис. 2 Потери ФКВ, рассчитанные для основной моды ФКВ(пунктирный график) и полного поля (сплошной график). Пунктирная линия показывает уровень 5 дБ/м.

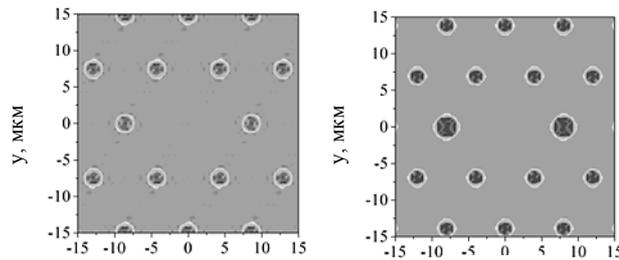


Рис.3 I $x, \text{ мкм}$ ое распределе $x, \text{ мкм}$ зателей преломления ФКВ с гексагональной структурой (слева) и ФКВ со стержнями увеличенного диаметра (ФКВ 2го типа).

При увеличении размеров отдельных элементов структуры (рис.3) появляются дополнительные моды в пределах фотонных запрещенных зон. Появление данных мод приводит к повышению потерь в определенном диапазоне длин волн (рис. 4б). Данный эффект может использоваться для создания спектральных селективных фильтров.

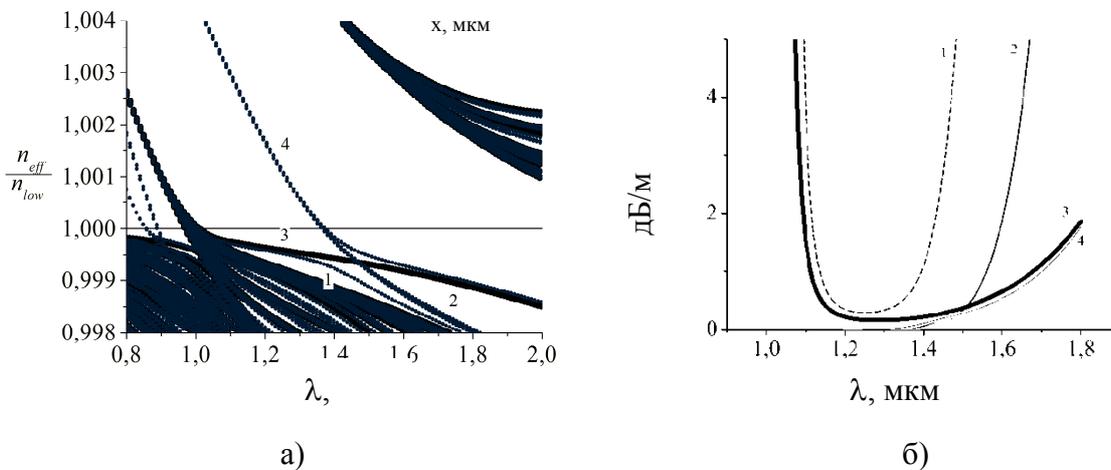


Рис.4. Дисперсионная диаграмма ФКВ, показанных на рис. 3. (а). Спектр затухания для основной моды ФКВ, показанного на рис. 3,а (линия 3) и мод ФКВ, показанного на рис 3, б (1,2 и 4 линии) (б)

Библиографический список

1. Schmidt M.A. et. al. All-solid bandgap guiding in tellurite-filled silica photonic crystal fibers // Optics Letters. 2009. V. 34(13). P. 1946-1949.
2. Lousteau G. et. al. Photonic bandgap confinement in an all-solid tellurite-glass photonic crystal fiber // Optics Letters. 2012. V. 37. P. 4922-4924.
3. Benson T.M., Hu B.B., Vukovic A., Sewell P. What is the future for beam propagation methods? // Proceedings SPIE, Photonics North. 2004. 5579 P.351-358.
4. Joannopoulos J.D. et. al. Photonic Crystals. Molding the Flow of Light– Princeton Univ. Press, 2008. 305 с.

ДИФРАКЦИЯ И ОТРАЖЕНИЕ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ ОТ ОБРЫВА ПЛАНАРНОГО ФЕРРИТОВОГО МИКРОВОЛНОВОДА

И.Е. Ревин, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: reviniv@gmail.com

В настоящее время нерегулярные планарные ферритовые волноведущие структуры представляют большой интерес [1,2]. Такие структуры могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, интерферометров, мультиплексоров, фильтров и ответвителей [3]. Вследствие анизотропии тонкопленочных ферритовых структур становится возможным управлять направлением распространения магнитоэлектронных волн (МЭВ) путем структурирования магнитного материала на подложке [2].

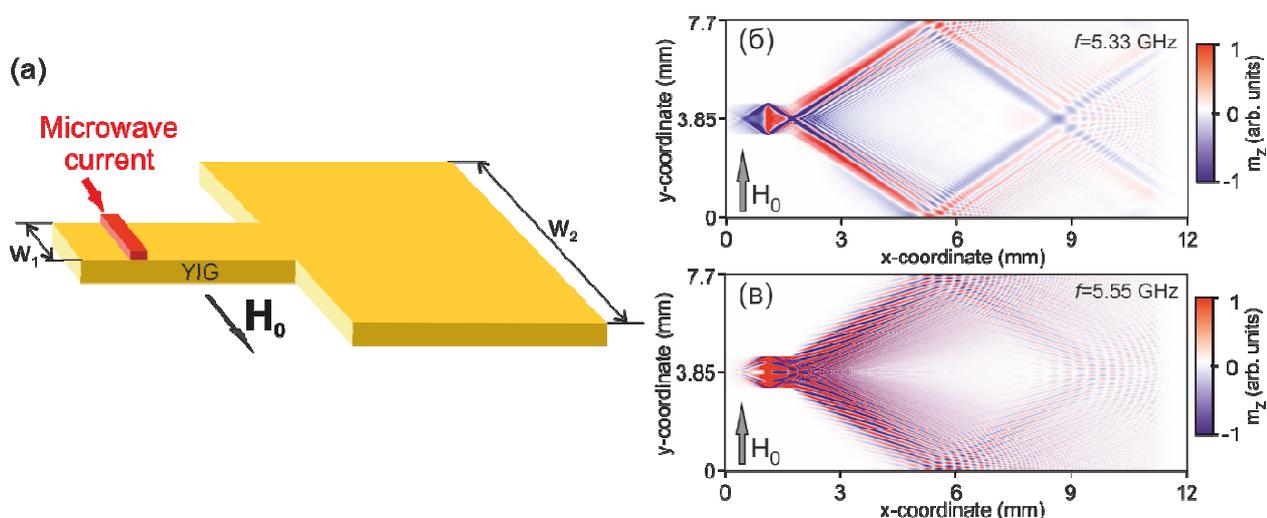


Рис. 1. Схема исследуемой структуры (а) и распределение компоненты намагниченности m_z на частотах входного сигнала $f=5.33$ GHz (б) и $f=5.55$ GHz (в).

В данной работе исследовано распространение и отражение поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) в нерегулярной структуре, представляющей собой обрыв планарного микроволновода, изготовленного из тонкой пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) (рис. 1а). Толщина пленки ЖИГ составляла 10 мкм, ширина узкой части нерегулярной структуры 1.2 мм, широкой части 7.7 мм, $M_0 = 139$ Гс – намагниченность насыщения пленки ЖИГ. Величина внешнего постоянного магнитного поля составляла 1220 Э.

Экспериментально методом мандельштам-бриллюэновской спектроскопии [5] показаны режимы дифракции ПМСВ в случае изменения частоты входного сигнала. Проведено численное решение методом конечных разностей во временной области [4] задачи о возбуждении и распространении ПМСВ в нерегулярной магнитной микроструктуре. На рис. 1 б,в приведены результат расчета распределения m_z компоненты намагниченности на частотах входного сигнала $f=5.33$ GHz и $f=5.55$ GHz. Результаты численного моделирования находятся в хорошем соответствии с данными экспериментального исследования.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-37-60093, 16-37-00217, 16-02-00789) и стипендии (СП-313.2015.5) и гранта (МК-5837.2016.9) президента РФ.

Библиографический список

1. *Sheshukova S., Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S.* Multimode Propagation of Magnetostatic Waves in a Width-Modulated Yttrium-Iron-Garnet Waveguide// IEEE Magn. Lett. 2014. V. 5.
2. *Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S.A.* Multimode Surface Magnetostatic Wave Propagation in Irregular Planar YIG Waveguide// Solid State Phenomena. 2014. V. 215. P. 389.
3. *Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D.* Magnonics// J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 264001.
4. *Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B.* The design and verification of mumax3 // AIP Advances. 2014. V. 4. P. 107133.
5. *Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N.* Brillouin light scattering studies of confined spin waves: linear and nonlinear confinement// Phys. Rep. 2001. V. 348. P. 441-489.

ФОКУСЫ ПО ОБЕ СТОРОНЫ ПЛОСКОЙ ЛИНЗЫ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ

В. Т. Ерофеенко

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

E-mail: bsu_erofeenko@tut.by

1. Постановка задачи

В пространстве R^3 с декартовой системой координат $Oxyz$ размещен плоский экран D ($0 < z < \Delta$). Экран ограничен плоскостями $\Gamma_1(z=0)$, $\Gamma_2(z=\Delta)$. Слой выполнен из биизотропного материала, характеризуемого материальными комплексными параметрами $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, $\mu = \mu_r \mu_0$, $G = G_r/c$, $Z = Z_r/c$; ε_0 , μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, c – скорость света в вакууме. В качестве материала экрана выберем фокусирующий метаматериал

$$\varepsilon_r = \delta, \quad \mu_r = 2(\tau - 1) - \delta, \quad G_r = Z_r = \pm i(1 + \delta), \quad (1)$$

где δ – произвольное комплексное число, τ – фокусирующий параметр ($\tau \rightarrow 0$).

В полупространстве $D_1(z < 0)$ на оси Oz в точке $O_1(0, 0, -h)$, $h > 0$, размещен магнитный диполь, колеблющийся с круговой частотой $\omega = 2\pi f$, который возбуждает первичное поле \vec{E}_0, \vec{H}_0 . В результате взаимодействия поля диполя с экраном D образуются поля: \vec{E}', \vec{H}' – поле в D_1 , отраженное от экрана D ; $\vec{E}_1 = \vec{E}_0 + \vec{E}'$, $\vec{H}_1 = \vec{H}_0 + \vec{H}'$ – суммарное поле в области D_1 ; \vec{E}, \vec{H} – поле в слое D ; \vec{E}_2, \vec{H}_2 – поле, проникшее в область $D_2(z > \Delta)$. Рассматривается временная зависимость полей вида $\exp(-i\omega t)$.

Краевая задача. При заданном поле \vec{E}_0, \vec{H}_0 требуется определить поля \vec{E}', \vec{H}' ; \vec{E}_2, \vec{H}_2 ; \vec{E}, \vec{H} , которые удовлетворяют уравнениям

$$\text{rot } \vec{E}_j = i\omega \mu_0 \vec{H}_j, \quad \text{rot } \vec{H}_j = -i\omega \varepsilon_0 \vec{E}_j \quad \text{в } D_j, \quad (2)$$

$$\text{rot } \vec{E} = i\omega(\mu \vec{H} + Z \vec{E}), \quad \text{rot } \vec{H} = -i\omega(\varepsilon \vec{E} + G \vec{H}) \quad \text{в } D, \quad (3)$$

граничным условиям непрерывности тангенциальных составляющих полей на плоскостях Γ_1, Γ_2

$$\left(\vec{E}_{1\tau} - \vec{E}_\tau\right)_{z=0} = 0, \quad \left(\vec{H}_{1\tau} - \vec{H}_\tau\right)_{z=0} = 0, \quad \left(\vec{E}_{2\tau} - \vec{E}_\tau\right)_{z=\Delta} = 0, \quad \left(\vec{H}_{2\tau} - \vec{H}_\tau\right)_{z=\Delta} = 0 \quad (4)$$

и условиям излучения на бесконечности.

2. Решение задачи

В случае, когда материальные параметры экрана имеют значения (1), решение задачи (2) – (4) представляется в интегральном виде через цилиндрические базисные поля [1].

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{E}}_0 &= \int_0^\infty A(\lambda, -h) \bar{M}_0^{(-1)} d\lambda = A_0 \tilde{m}_{01}(O_1), \quad \bar{\mathbf{H}}_0 = \int_0^\infty h_0 A(\lambda, -h) \bar{M}_0^{(-2)} d\lambda = h_0 A_0 \tilde{n}_{01}(O_1), \quad z > -h, \\ \bar{\mathbf{E}}'_1 &= \int_0^\infty (x_1(\lambda) \bar{M}_0^{(+1)} + y_1(\lambda) \bar{M}_0^{(+2)}) d\lambda, \quad \bar{\mathbf{H}}'_1 = \int_0^\infty h_0 (x_1(\lambda) \bar{M}_0^{(+2)} + y_1(\lambda) \bar{M}_0^{(+1)}) d\lambda, \quad z < 0, \\ \bar{\mathbf{E}}_2 &= \int_0^\infty x_2(\lambda) \bar{M}_0^{(-1)} d\lambda, \quad \bar{\mathbf{H}}_2 = \int_0^\infty h_0 x_2(\lambda) \bar{M}_0^{(-2)} d\lambda, \quad z > \Delta,\end{aligned}\quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{E}} = \frac{1}{4} \int_0^\infty (a_1(\lambda) \bar{K}_0^{(+1)} + a_2(\lambda) \bar{K}_0^{(-1)} + a_3(\lambda) \bar{K}_0^{(+2)} + a_4(\lambda) \bar{K}_0^{(-2)}) d\lambda, \quad 0 < z < \Delta,$$

$$\bar{\mathbf{H}} = \frac{1}{4} \int_0^\infty (p_1 a_1(\lambda) \bar{K}_0^{(+1)} + p_1 a_2(\lambda) \bar{K}_0^{(-1)} + p_2 a_3(\lambda) \bar{K}_0^{(+2)} + p_2 a_4(\lambda) \bar{K}_0^{(-2)}) d\lambda,$$

где $\bar{K}_0^{(\pm j)} = \bar{M}_0^{(\pm 2)} - q_j \bar{M}_0^{(\pm 1)}$ – цилиндрические поля в метаматериале [2, с.139],

$q_j = -1, q_2 = 1$; $\bar{M}_0^{(\pm 1), (\pm 2)}(\rho, \varphi, z; \lambda, k_0)$ – цилиндрические базисные поля [2, с.130],

$$a_1(\lambda) = -(\mu_r - 1 - i\chi) A(\lambda, -h), \quad a_2(\lambda) = (\mu_r + 1 + i\chi) A(\lambda, h_f),$$

$$a_3(\lambda) = (\mu_r - 1 + i\chi) A(\lambda, -h), \quad a_4(\lambda) = -(\mu_r + 1 - i\chi) A(\lambda, h_f),$$

$$A(\lambda, h_s) = A_0 C(\lambda) \exp(\nu_0(\lambda) h_s), \quad A_0 = \text{const}, \quad C(\lambda) = -\frac{i\lambda^2}{k_0^2 \nu_0(\lambda)},$$

$$\nu_0(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 - k_0^2}, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \arg \nu_0(\lambda) < \frac{\pi}{2}, \quad h_f = 2\Delta - h, \quad k_0 = \frac{\omega}{c}$$

$$p_1 = -(i + \chi) / \mu_r Z_0, \quad p_2 = (i - \chi) / \mu_r Z_0, \quad Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0};$$

$$x_1(\lambda) = \frac{\alpha_1}{T(\lambda)} (A(\lambda, h_f) - A(\lambda, -h)), \quad y_1(\lambda) = -\frac{\alpha_2}{T(\lambda)} (A(\lambda, h_f) - A(\lambda, -h)),$$

$$y_2(\lambda) = A(\lambda, h_f) / T(\lambda), \quad T(\lambda) = 1 - \frac{\tau}{2} (1 - \exp(2\nu_0(\lambda)\Delta)),$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{4} (\mu_r - \varepsilon_r), \quad \alpha_2 = \frac{i\chi}{2}.$$

При условии фокусировки $\tau = 0$ поля (5) преобразуются в суммы полей электрического и магнитного диполей, ориентированных вдоль оси Oz .

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{E}}_1 &= \bar{\mathbf{E}}_0 + \bar{\mathbf{E}}'_1 = A_0 (\tilde{m}_{01}(O_1) + \alpha_1 \tilde{m}_{01}(O_2) - \alpha_2 \tilde{n}_{01}(O_2) - \alpha_1 \tilde{m}_{01}(O_3) + \alpha_2 \tilde{n}_{01}(O_3)), \quad z < 0, \\ \bar{\mathbf{E}} &= A_0 (\alpha_2 \tilde{n}_{01}(O_3) + (1 - \alpha_1) \tilde{m}_{01}(O_3) + \alpha_2 \tilde{n}_{01}(O_f) + \alpha_1 \tilde{m}_{01}(O_f)), \quad 0 < z < \Delta,\end{aligned}\quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{E}}_2 = A_0 \tilde{m}_{01}(O_f), \quad z > \Delta,$$

где $\tilde{m}_{01}, \tilde{n}_{01}$ – сферические поля [2, с. 118] с источниками в точках $O_1(0, 0, -h), O_2(0, 0, h - 2\Delta), O_3(0, 0, h), O_f(0, 0, 2\Delta - h)$. Анализ полей (6) показывает, что при условии $0 < z < \Delta$ особая точка $O_f \in D_2$, а особая точка $O_2 \in D_1$, т.е. точки O_f и O_2 являются фокусами, расположенными по обе стороны экрана D .

Библиографический список

1. Ерофеев В.Т. Двухсторонняя фокусировка электромагнитного поля точечного источника плоской линзой из метаматериала // Информатика. 2016. № 1. С. 14 - 25.
2. Ерофеев В.Т. Козловская И.С. Аналитическое моделирование в электродинамике. - М.: ДК Либроком, 2014. 304 с.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СТРУКТУРЕ СВЯЗАННЫХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

М.А. Морозова, О.В. Матвеев

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: olvmatveev@gmail.com

В настоящее время большой интерес вызывают кристаллы, подобные фотонным, на основе магнитных плёнок – магنونные кристаллы (МК), в которых распространяющимися волнами являются магностатические волны (МСВ) [1]. Принципиальной особенностью периодических структур является наличие брэгговских резонансов, которые приводят к возникновению запрещенных зон в спектре МСВ. В периодических структурах при распространении сигналов больших мощностей происходит нелинейный сдвиг запрещенных зон [2], что приводит к эффекту «нелинейного переключения МК», при котором периодическая структура начинает пропускать сигнал большой мощности на частотах, лежащих внутри запрещенной зоны.

Связанные структуры существенно расширяют функциональные возможности радиофизических систем, т.к. появляется дополнительный управляющий параметр – связь. В случае двух связанных волноведущих ферромагнитных структур связь приводит к появлению быстрой и медленной волн, распространяющихся с различными групповыми и фазовыми скоростями, характеристиками которых можно управлять путем изменения величины связи [3,4]. В связанных однородных структурах имеет место эффект «нелинейного переключения», который проявляется в подавлении линейной перекачки между плёнками в структуре при большом уровне мощности. В этом случае наблюдается «заграждающий режим» и сигнал «не замечает» вторую плёнку.

В структуре связанных магنونных кристаллов при распространении импульсов будут проявляться нелинейные особенности, характерные как для МСВ в одиночных МК: в структуре будет наблюдаться двойное нелинейное переключение [5], причем соответствующие пороги переключения сильно зависят от геометрии структуры. Поэтому актуальной задачей является построение карты параметров такой структуры.

На основе подхода, основанного на методе связанных волн, построена нелинейная модель, описывающая распространение магнитостатических волн в структуре связанных МК. Модель представляет систему нелинейных уравнений Шредингера, описывающих поведение амплитуд огибающих для прямых и встречных волн в рассматриваемых связанных структурах с учетом линейной и нелинейной связи между ними. Линейная связь определяется геометрией структуры: связь между прямыми и встречными волнами определяется периодом и толщиной структуры, связь между прямыми волнами определяется расстоянием между магнетонными кристаллами.

Таким образом, в структуре связанных МК имеет место эффект «двойного нелинейного переключения» (существует две точки нелинейного переключения - значения входной амплитуды, в которых меняется характер распространения сигнала). Данная особенность даёт возможность использовать связанные МК для осуществления ряда операций по функциональной обработке нелинейных СВЧ сигналов. Например, линия передачи на основе связанных МК может функционировать как нелинейный направленный ответвитель, в котором в зависимости от входной мощности импульс выйдет через один из четырёх портов связанной структуры.

Библиографический список

1. Nikitov S. A., Tailhades Ph., Tsai C.S. Spin waves in periodic magnetic structures - magnonic crystals // JMMM, 2001. V. 236, N. 3. P. 320-330.
2. Agrawal G.P. *Applications of nonlinear optics*. - San Diego: Acad. Press, 2001. 472p.
3. Orlov S.S., Yariv A., van Essen S. Coupled-mode analysis of fiber-optic add-drop filters for dense wavelength-division multiplexing // Optics Letters. 1997. V. 22, N. 10. P. 688-690.
4. Бегунин Е. Н., Морозова М.А., Шараевский Ю.П. Нелинейные эффекты самовоздействия волн в 2D-связанных ферромагнитных структурах // ФТТ. 2010. Т. 52, В. 1. С. 76-82.
5. Morozova M. A., Matveev O. V. Propagation of nonlinear pulses of magnetostatic waves in coupled magnonic crystals // Phys. Wave Phenom. 2015. V. 22, N. 2. P. 114-121.

3. МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

МУЛЬТИЯДЕРНАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАРМПРЕПАРАТОВ

Ю.А. Пирогов

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

E-mail: yupi937@gmail.com

Разработанные в Центре магнитной томографии и спектроскопии МГУ [1] новые методы мультаядерной МРТ визуализации позволили осуществить широкий класс преclinical исследований малых лабораторных животных на 7-Тл биоспектротомографе фирмы Bruker BioSpec 70/30 URS и 0.5-Тл медицинском томографе BrukerTomikonS50. В результате были изучены возможности целевой доставки фармпрепарата к очагам патологических изменений [2] и научиться неинвазивно (без хирургического вмешательства, *in vivo*) определять по спектру ЯМР степень поражения тканей живых организмов [3].

Особенно продуктивным оказалось направление совместного применения опций магнитно-резонансной томографии и ЯМР спектроскопии, так называемой локальной ЯМР спектроскопии. Последняя на 7-Тл сканере может осуществляться не только на протонах, но и на ряде тяжелых ядер – ^2H , ^{13}C , ^{19}F , ^{29}Si и ^{31}P , а на 0.5-Тл приборе на 8 ядрах, тех же ^2H , ^{13}C , ^{19}F , ^{29}Si и ^{31}P , а также на ^{11}B , ^{23}Na и ^{35}Cl . Отметим, что такое мультаядерное расширение визуализационно-спектральных возможностей медицинского сканера на примере томографа TomikonS50 было реализовано впервые в мировой практике. Метод локальной ЯМР спектроскопии позволяет локализовать в интересующей ткани малый объем с поперечным размером 2.5-3 мм на БиоСпеке, 1-1.5 см на Томиконе и произвести в этом вокселе измерения спектров ЯМР как на протонах, так и на тяжелых ядрах. По расположению в спектре (химическому сдвигу) и амплитуде спектральных линий, ответственных за характерные метаболиты ткани, можно судить о степени ишемизации ткани, типе опухолевых образований, в реальном

времени измерять *in vivo* локальный метаболический портрет и температуру внутренних органов [4]. Такой подход комбинированного использования МРТ и ЯМР спектроскопии по существу представляет собой неинвазивные аналоги биопсии, метаболомики и внутритканевой термометрии.

Недостаточно высокие значения ЯМР сигнала от тяжелых ядер можно увеличить за счет применения эффекта гиперполяризации, основанной на двух- или трехступенчатой намагниченности ядерного ансамбля. Так, в случае нано-препаратов, содержащих углерод ^{13}C , посредством микроволновой накачки при гелиевых температурах в высоких (около 1 Тл) магнитных полях можно осуществить намагниченность квазисвободных электронов (эффект ЭПР), которая за счет электрон-ядерного эффекта Оверхаузера будет передаваться ядрам ^{13}C . Сформированное таким образом гиперполяризованное состояние сохраняется в течение десятка секунд, достаточных для размораживания препарата, разведения его в растворителе, инъекции в кровоток и регистрации МРТ сигнала, по уровню сравнимого с протонным ЯМР откликом [5]. Весьма короткое время деполяризации, создающее понятные трудности при выполнении диагностических процедур, может быть, однако, существенно увеличено (до десятков минут) посредством сценария, аналогичного описанной в [6] трехступенчатой гиперполяризации заключенных в полимерную оболочку микрочастиц ^{29}Si размером 1-2 мкм. В этом случае сначала также посредством ЭПР намагничивается поверхностный подоболочечный электронный ансамбль, намагниченность которого посредством электрон-ядерного эффекта Оверхаузера передается близким к поверхности ядрам ^{29}Si . Затем намагниченность поверхностных слоев диффундирует в область глубинных слоев за счет ядер-ядерного эффекта Оверхаузера. Созданная в результате гиперполяризация микрочастиц кремния после размораживания и удаления из магнитного поля сохраняется длительное (до 30 минут!) время. Тому способствует медленная обратная диффузия размагничивания поверхностных слоев во внутренние слои гиперполяризованной частицы, что и обеспечивает значительную задержку тотальной деполяризации. Гиперполяризация позволяет реализовать высокого качества МРТ имиджинг даже при очень малых магнитных полях значением в сотые доли Тесла и создавать МРТ устройства, свободные от применения криогенных магнитов.

Обсуждаются также разработки новых эффективных методик подавления злокачественных опухолей посредством магнитной гипертермии, основанной на применении капсулированных декстран-ферритовых наночастиц, нагреваемых высокочастотным (с частотой 10 МГц) магнитным полем [7]. Для МРТ визуализации областей накопления инъецированных фторуглеродных нано-фармпрепаратов в живом организме разработан новый бимодальный контрастный агент, основанный на соединениях перфторуглеродов и гадолиниевых кон-

трастеров, позволяющий осуществлять эффективный имиджинг как на протонах, так и на ядрах фтора-19 [8].

В экспериментах были использованы МРТ сканеры Bruker Tomikon S50 и BioSpec 70/30 USR, которые принадлежат ЦКП МГУ «Биоспектротомография» и входят в состав уникального комплекса научных установок (УНУ) с тем же наименованием «Биоспектротомография».

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ №14.604.21.0060 (RFMEFI60414X0060).

Библиографический список

1. Анисимов Н.В., Батова С.С., Пирогов Ю.А. *Магнитно-резонансная томография: управление контрастом и междисциплинарные приложения.* – М.: МАКСПресс, 2013. 244 с.
2. Yusubaliyeva G., Baklaushev V., Gurina O., et al. Antitumor effects of monoclonal antibodies to connexin 43 extracellular fragment in induced low-differentiated glioma // Bull. Exp. Biol. Med. 2012. 53(1). P. 163-169.
3. Гуляев М.В., Губский Л.В., Черкашова Э.А. и др. Локальная ЯМР спектроскопия в изучении ишемии головного мозга // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013. № 1. С. 1-9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/9/text.html>.
4. Гуляев М.В., Ханов С.К., Наместникова Д.А. и др. Магнитно-резонансная термометрия головного мозга крыс методом локальной ЯМР спектроскопии // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013. №10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct13/10/text.html>.
5. Ross B., Lin A., Harris K., et al. Review Article: Clinical experience with ¹³C MRS *in vivo* // NMR Biomed. 2003. 16. P. 358-369.
6. Cassidy M., Chan H., Ross B., et al. *In vivo* magnetic resonance imaging of hyperpolarized silicon particles // Nature Nanotechnology. 2013. V. 8. P. 363-368.
7. Brusentsov N.A., Pirogov Yu.A., Polyanskiy V.P., et al. Magnetohydrodynamic thermochemotherapy and MRI of malignant tumorigenesis // Solid State Phenomena. 2012. V.190. P. 717-720.
8. Шибаетов А.В., Гервиц Л.Л., Филиппова О.Е., Гуляев М.В., Анисимов Н.В., Пирогов Ю.А., Хохлов А.Р. Новый двумодальный контрастный агент для магнитно-резонансной томографии // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2016. №3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar16/8/text.html>.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ АГЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ МОЗГОВОГО КРОВОТОКА У НОВОРОЖДЕННЫХ МЫШЕЙ

*Д.К. Тучина¹, П.А. Тимошина¹, А.С. Абдурашитов¹, М.М. Сагатова¹,
Е.М. Зинченко¹, О.В. Семячкина-Глушкова¹, В.В. Тучин^{1,2,3}*

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского

²Национальный исследовательский томский государственный университет

³Институт точной механики и управления РАН

E-mail: tuchinadk@mail.ru

Введение

Довольно часто у новорожденных развиваются мозговые кровотечения (геморрагии), причем происходит это бессимптомно, поэтому их сложно диагностировать. В большинстве случаев разрывы сосудов коры головного мозга у новорожденных сказываются впоследствии на здоровье и развитии таких детей. Оптические технологии, благодаря своей неинвазивности и сравнительной простоте реализации, возможности обеспечения прикроватной диагностики (point-of-care), являются перспективными для диагностики риска развития внутричерепных геморрагий у новорожденных. Однако сильное рассеяние кожи ограничивает применение оптических методов. Для снижения рассеяния кожи, и, соответственно, увеличения глубины проникновения света через кожу к сосудам коры головного мозга можно использовать метод оптического просветления биологических тканей. За счет временного частичного замещения внутритканевой жидкости ткани оптическим просветляющим агентом (ОПА) происходит согласование показателей преломления рассеивателей биоткани и окружающей их среды, кроме того за счет обратимой дегидратации ткани рассеиватели организуются более упорядочено, все это приводит к снижению рассеяния света в коже.

Целью настоящей работы являлось исследование изменения качества визуализации мозгового кровотока новорожденных мышей при нанесении на поверхность кожи головы 60%-раствора глицерина, а также изучение воздействия раствора глицерина на церебральную гемодинамику новорожденных мышей.

Материалы и методы

Исследования проводились в районе переднего родничка головы новорожденных мышей возрастом 2-3 дня. Животные были разделены на две группы: контрольную, на которую не оказывалось воздействие оптического просвет-

ляющего агента (ОПА), и экспериментальную. В качестве ОПА использовался водный 60%-раствор глицерина (показатель преломления 1.415).

Измерение скорости мозгового кровотока проводилось двумя способами: с помощью доплеровской оптической когерентной томографии (ДОКТ) и лазерной спекл-визуализации. В первом случае использовался коммерческий ОКТ с возможностью анализа доплеровского сигнала OCM1300SS (Thorlabs Inc., США). Объект исследования располагался перпендикулярно оптической оси, таким образом максимальный вклад в доплеровский сигнал вносили лучи, идущие под апертурным углом (7.5°). Продольное и поперечное разрешение установки составляло 12 и 15 мкм соответственно. Во втором случае производился анализ контраста усредненных по времени спекл-модулированных изображений. Спекл-модулированные изображения поверхности анализируемого участка получали и регистрировали с помощью одномодового He-Ne лазера ГН-5П с длиной волны 632.8 нм и монохромной КМОП-камеры (Basler a602f, число пикселей в матрице 656×491 , размер пикселя 9.9×9.9 мкм; 8 бит/пиксель). Для проведения измерений и расчета контраста в среде LabVIEW 8.5 (National Instruments, США) была создана программа, позволяющая в режиме реального времени с частотой до 100 кадров в секунду регистрировать распределения интенсивности спекл-поля и рассчитывать по указанной оператором области средний контраст (I) или пространственное распределение контраста. Далее оценивалась скорость кровотока ($v_{blood} \sim 1/I$).

Регистрация спекл-изображений и ДОКТ сканов исследуемого участка в экспериментальной группе производилась следующим образом: сначала записывался сигнал для кожи до воздействия агента, далее агент наносился на исследуемый участок на 5 мин, после чего агент удалялся, и производились повторные измерения. Нанесение и удаление агента, а также измерения производились каждые 5 мин в течение 20 мин действия агента. Затем кожа с исследуемой области срезалась и производилась новая запись данных. В контрольной группе животных производилась запись через интактную кожу, затем кожа срезалась и запись производилась повторно. Для каждого способа измерений использовалось по 20 мышей, 10 из которых входили в контрольную группу, 10 – в экспериментальную.

Результаты исследований

На рисунке 1 представлены типичные изображения в когерентном свете и контраст-изображения сосудов головы новорожденной мыши до и при воздействии на поверхность кожи водного 60%-раствора глицерина. Видно, что качество визуализации сосудов существенно улучшилось, что связано со снижением рассеяния кожи под воздействием раствора глицерина.

На рисунке 2 представлена кинетика изменения скорости кровотока в сосудах головного мозга мышей до и в процессе воздействия на поверхность кожи раствора глицерина, полученная после нормировки на значение скорости до воздействия ОПА на кожу. На рисунке 3 представлены значения скорости кровотока в сосудах головного мозга после снятия кожи у мышей контрольной и экспериментальной групп после 20-мин воздействия глицерина при нормировке на значение скорости, измеренное для контрольной группы. Представленные результаты получены с помощью обоих методов: спекл – контрастной визуализации и ДОКТ. Можно видеть, что скорость кровотока незначительно изменяется при нанесении на поверхность кожи раствора глицерина.

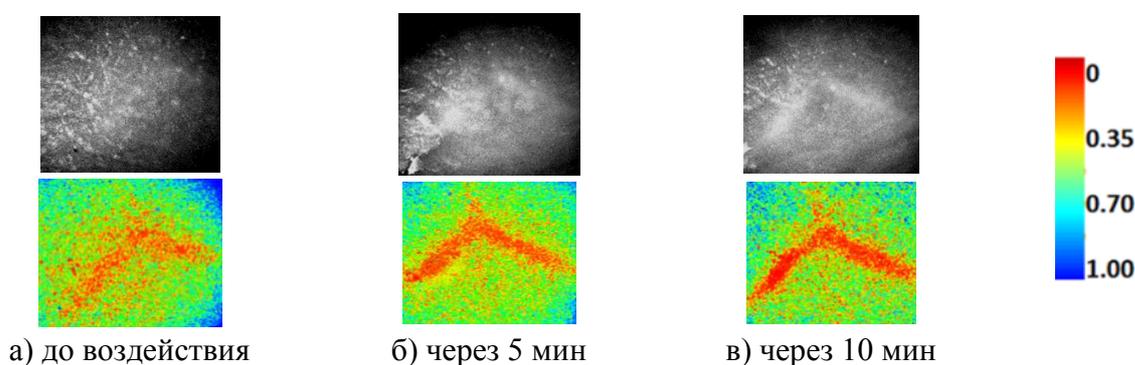


Рис. 1. Изображения сосудов головного мозга исследуемого животного в когерентном свете (633 нм) (черно-белое) и рассчитанное распределение контраста спеклов (1-0) (цветной) при воздействии водного 60% - раствора глицерина: а) до воздействия, б) через 5 мин, в) через 10 мин после нанесения агента

Из приведенных данных видно, что после пяти минут применения ОПА имеет место незначительное изменение скорости кровотока, что можно связать со снижением рассеяния поверхностного слоя кожи вследствие использования раствора глицерина на исследуемой области. Такой вывод можно сделать, сравнивая результаты полученные после снятия кожи у животных экспериментальной и контрольной групп. Видно, что после среза кожи агент с учетом ошибки измерений не вызывает изменений скорости кровотока. Сравнение двух методик визуализации продемонстрировало небольшую разницу между средними значениями скорости кровотока, что можно связать с различиями как в измеряемых параметрах кровотока, так и геометрии измерений. В случае спекл-визуализации слой кожи, а в частности кожные сосуды, вносят определенную модуляцию в сигнал, при ДОКТ измерениях слой кожи может вносить дополнительный угол преломления пучка, что, естественно, должно сказываться на величине доплеровского сигнала. Поэтому просветление кожи немного по-разному влияет на само измеряемое значение параметров кровотока. При

этом после среза кожи мы видим абсолютно противоположный эффект отклика микроциркуляции кровотока после использования раствора глицерина, что возможно связано с изменением оптических условий на границе кожа ткани черепа при действии агента. Однако все изменения происходят в пределах статистической ошибки и в целом влияние просветляющего агента на мозговой кровоток незначительное при существенном повышении контраста спекл-изображений сосудов через интактный кожный покров и ткани черепа.

Для более полного изучения наблюдаемого разнонаправленного отклика спекл- и ДОКТ-измерений параметров кровотока необходимы дальнейшие исследования.

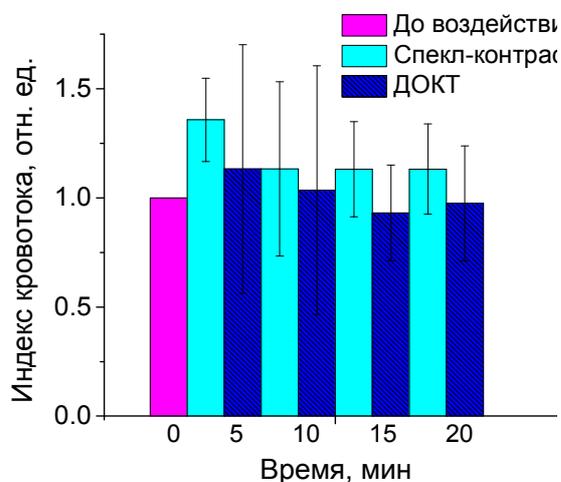


Рис. 2. Кинетика изменения скорости кровотока в сосудах головного мозга мышей до (до воздействия) и в процессе воздействия на них ОПА, полученная после нормировки на значение скорости до воздействия ОПА на кожу

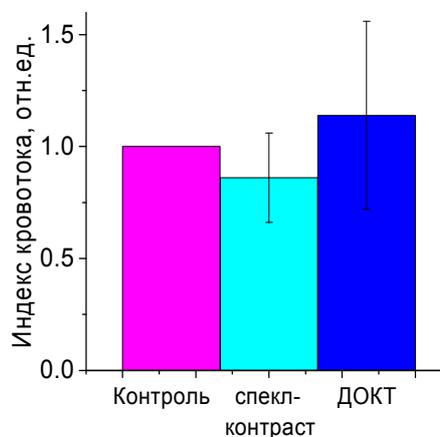


Рис. 3. Скорость кровотока в сосудах головного мозга после снятия кожи мышей контрольной группы (контроль) и экспериментальной группы после 20-мин воздействия глицерина при нормировке на значение скорости, полученное для контрольной группы

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что применение водного 60%-раствора глицерина приводит к улучшению качества визуализации мозгового кровотока у новорожденных мышей, максимальный эффект просветления достигается уже через 5-10 мин использования агента. Также в результате исследований было выявлено, что раствор глицерина не оказывает заметного влияния на микроциркуляцию мозга мыши.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (14-02-00526-14).

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ ДЛЯ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

С.Д. Стучебрюков, В.М. Сухов
Институт физической химии и электрохимии
им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва
E-mail: sstuch@rambler.ru

В работе представлены результаты исследования поведения максимальной эффективности ближнего поля сферических золотых наночастиц в широком диапазоне длин волн от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области. Расчеты, выполненные с помощью теории Ми [1] для сферических наночастиц, показывают, что при заданных длине волны падающего излучения λ и показателе преломления окружающей среды n зависимости эффективности ближнего поля Q_{nf} [2] от радиуса наночастиц R имеют вид гладких кривых с максимумом.

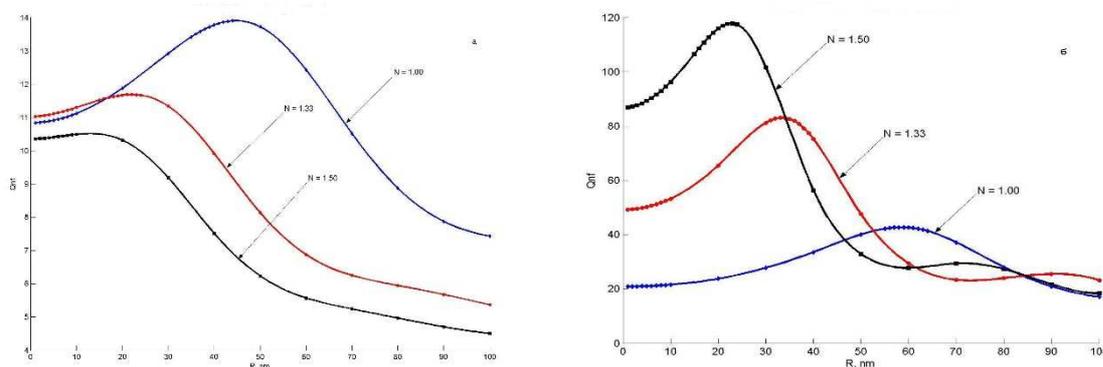


Рис. 1. Экстремальные зависимости $Q_{\text{nf}}(R)$ для двух длин волн: 480 нм (а) и 550 нм (б). Из их сравнения видно, что наблюдается инверсия кривых относительно показателя преломления окружающей среды.

Следовательно, располагая достаточным количеством таких кривых (см. рис. 1), можно найти как сами максимальные величины эффективности ближнего поля $Q_{\text{nf}}^{\text{max}}(\lambda)$, так и соответствующие им значения радиуса частиц $R^{\text{max}}(\lambda)$. Графики функций $Q_{\text{nf}}^{\text{max}}(\lambda)$ и $R^{\text{max}}(\lambda)$ были построены в диапазоне длин волн от 320 до 1064 нм (рис. 2). В качестве типичных сред, окружающих золотые наночастицы, были выбраны воздух ($n = 1$), вода ($n = 1.33$) и модельное органическое соединение с $n = 1.5$. В расчетах использовали оптические постоянные золота, полученные в [3].

Любопытная особенность функций $Q_{nf}^{\max}(\lambda, n)$ состоит в том, что в интервале длин волн от 320 до ≈ 500 нм их наибольшие численные значения достигаются для $n = 1$, наименьшие – для $n = 1.5$, промежуточные – для $n = 1.33$. При $\lambda_i \approx 506$ нм для всех выбранных n величины Q_{nf}^{\max} становятся близкими друг другу, т.е. в этой точке выполняется условие $\partial Q_{nf}^{\max} / \partial n |_{\lambda_i} \approx 0$. Далее, во всем изученном спектральном диапазоне имеют место прямо противоположные неравенства, т.е. $Q_{nf}^{\max}(\lambda, 1.5) > Q_{nf}^{\max}(\lambda, 1.33) > Q_{nf}^{\max}(\lambda, 1)$.

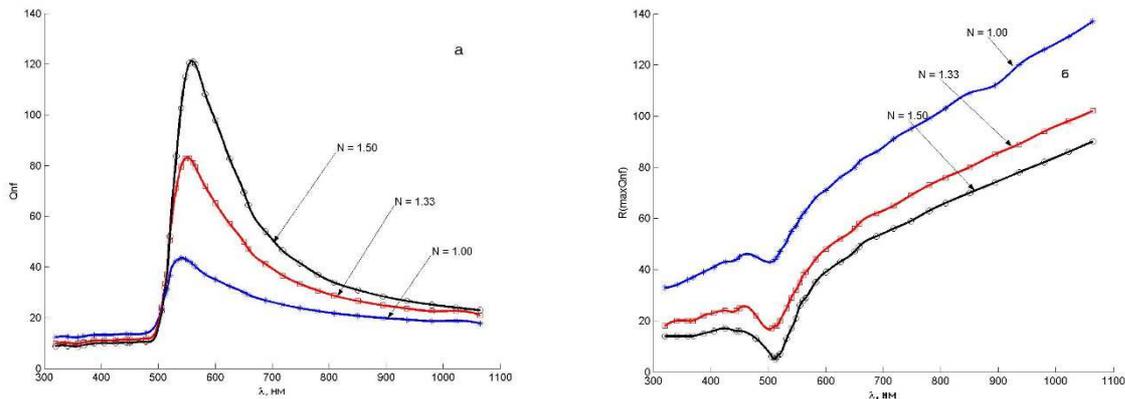


Рис. 2. Зависимости $Q_{nf}^{\max}(\lambda)$ (а) и $R^{\max}(\lambda)$ (б). На левом графике видна точка инверсии, а на правом – локальные минимумы R^{\max} .

Для всех рассмотренных случаев графические зависимости $Q_{nf}^{\max}(\lambda, n)$ представляют собой асимметричные кривые резонансного типа, причем с увеличением показателя преломления окружающей среды положения максимумов этих кривых изменяются незначительно: $\lambda^{\max} = 541$ нм ($n = 1$), $\lambda^{\max} = 551$ нм ($n = 1.33$) и $\lambda^{\max} = 559$ нм ($n = 1.5$). В то же время, сами экстремальные значения Q_{nf}^{\max} существенно возрастают: $Q_{nf}^{\max} = 43.5$ ($n = 1$), 83 ($n = 1.33$) и 121 ($n = 1.5$). Следует также отметить достаточно заметные различия значений Q_{nf}^{\max} на противоположных концах рассматриваемого интервала длин волн. Так, для $\lambda = 320$ нм имеем $Q_{nf}^{\max} \approx 10-12$, а для $\lambda = 1064$ нм $Q_{nf}^{\max} \approx 20-30$.

Для поведения функций $R^{\max}(\lambda, n)$ характерны следующие закономерности. Во-первых, $R^{\max}(\lambda, 1) > R^{\max}(\lambda, 1.33) > R^{\max}(\lambda, 1.5)$ для любых λ . Во-вторых, все три графика представляют собой симбатно изменяющиеся кривые, имеющие по одному явно выраженному минимуму при $\lambda = 503$, 503 и 512 нм, соответственно. При этом $R^{\max}(503, 1.0) \approx 43$ нм, $R^{\max}(503, 1.33) \approx 16$ нм, а $R^{\max}(503, 1.5) \approx 5$ нм. В-третьих, при больших значениях λ во всем рассматриваемом спектральном диапазоне наблюдается устойчивый рост параметра $R^{\max}(\lambda, n)$. Для $n = 1.5$ изменение λ от 320 до 1064 нм приводит к возрастанию

значения R^{\max} от 15 до 85 нм; для $n = 1.33$ R^{\max} увеличивается от 20 до 100 нм; при $n = 1$ эта же величина изменяется от 30 до 140 нм.

Таким образом, проведенные расчеты позволили выявить ряд закономерностей, присущих поведению функций $Q_{\text{nf}}^{\max}(\lambda, n)$ и $R^{\max}(\lambda, n)$ в достаточно широком практически значимом спектральном диапазоне. Полученные результаты представляют, на наш взгляд, существенный интерес как с точки зрения развития фундаментальных исследований в области наноплазмоники [4], так и при решении ряда прикладных, в частности, медико-биологических задач.

Библиографический список

1. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеивание света малыми частицами. - М.: Мир, 1986. 664 с.
2. Messinger B.J., von Raben K.U., Chang R.K., Barber P.W. Local fields at the surface of noble-metal microspheres // Phys. Rev. B. 1981. V. 24. P. 649.
3. Johnson P.B., Christy R.W. // Phys. Rev. B. 1972. V. 6. P. 4370.
4. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2010. 480 с.

СИНТЕЗ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ (ОМК) ГИДРОКСИАПАТИТ (ГА)/МЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗА (МЦ) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЧ

Н.А. Захаров, Т.В. Захарова, М.А. Орлов
Институт общей и неорганической химии
им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва
E-mail: zakharov@igic.ras.ru

Определено влияние воздействия СВЧ на размеры и морфологию нанокристаллов биосовместимого гидроксиапатита кальция $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (ГА) в составе органоминеральных композитов (ОМК) ГА/метилцеллюлоза ($[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OCH}_3)_x]_n$) (МЦ) при синтезе из водных растворов в системе $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-}([\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OCH}_3)_x]_n)\text{-H}_2\text{O}$. На основе результатов физико-химического анализа (химического, РФА, ИКС, ДТА, ТДГ, СЭМ, ПЭМ) продуктов синтеза проанализированы фундаментальные взаимосвязи состав – условия синтеза – структура – дисперсность – свойства при воздействии СВЧ в условиях синтеза, моделирующих процесс биоминерализации нанокompозита, имитирующего состав костной ткани.

Нативная костная ткань является природным ОМК, состоящим из биоапатита, модельным аналогом которого является стехиометрический ГА, протеинов (в основном, коллагена), полисахаридов, клеточного матрикса и нативных жидкостей. Создание материалов, имитирующих состав костной ткани для искусственных имплантатов, является актуальной задачей материаловедения. Интенсификация процессов синтеза материалов имплантатов в условиях внешних воздействий (включая воздействие СВЧ) и моделирование воздействия СВЧ на процессы биоминерализации входит в число приоритетных задач химии, биофизики и химической технологии функциональных материалов.

Целью работы явилось определение возможности создания ОМК ГА/МЦ и оценка характера и степени влияния воздействия СВЧ излучения на кристаллизацию ГА в ходе его осаждения из водных растворов, кристаллографические и морфологические характеристики нанокристаллов ГА (НКГА) в составе ОМК ГА/МЦ.

Синтез ОМК ГА/МЦ (1 мас.%) из водного раствора в системе $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-}([\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OCH}_3)_x]_n)\text{-H}_2\text{O}$ проводили на воздухе в продолжение 3, 5 и 10 мин. в СВЧ устройстве (LGMS-1744W, F=2450 МГц; W=700 Вт). По окончании синтеза раствор отстаивали, декантировали и сушили на воздухе при 100°C . Продуктом синтеза являлся гексагональный (пр. гр. $\text{P6}_3/\text{m}$) НКГА стехиометрического ($\text{Ca}/\text{P}=1.67$) состава, параметры элементарной ячейки которого находятся в удовлетворительном соответствии с табличными данными (JCPDS № 9-432: $a=9,418 \text{ \AA}$; $c=6,884 \text{ \AA}$) (табл. 1). В продуктах синтеза и отожженных (1000°C , 2 ч) образцах НКГА примеси посторонних фаз отсутствовали (рис. 1).

Таблица 1. Кристаллографические и морфологические характеристики НКГА в составе ОМК ГА/МЦ (1 масс.%), образующегося в системе $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-}([\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OCH}_3)_x]_n)\text{-H}_2\text{O}$ в ходе синтеза под воздействием СВЧ в продолжение 3, 5 и 10 мин.

($\parallel \text{C}$, $\perp \text{C}$ – размеры НКГА вдоль и перпендикулярно гексагональной оси “c”, соответственно)

Время синтеза, мин.	Состав (брутто, с учетом Адсорбированной воды)	Параметры э.я., \AA		Размеры кристаллов, нм		Соотношение $\parallel \text{C} / \perp \text{C}$
		a	c	$\parallel \text{C}$	$\perp \text{C}$	
3	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 3.9\text{H}_2\text{O}$	9.415	6.879	33	24	1.38
5	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 4.3 \text{H}_2\text{O}$	9.415	6.881	34	26	1.31
10	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 4.2 \text{H}_2\text{O}$	9.413	6.880	39	21	1.86

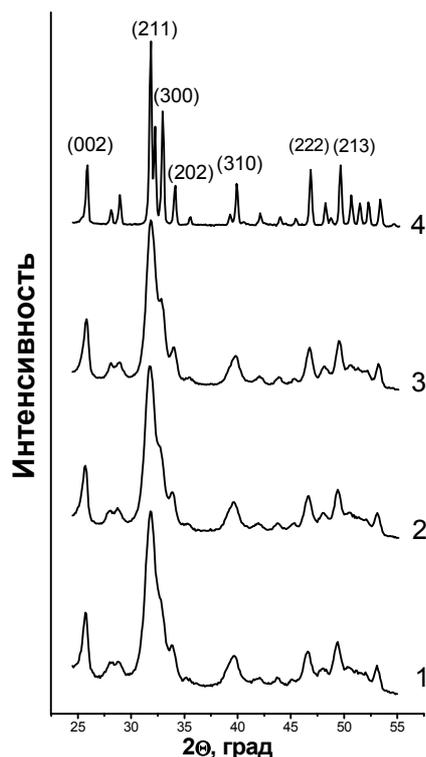


Рис. 1. Дифрактограммы ОМК ГА/МЦ (1%), синтезированного под воздействием СВЧ излучения при максимальной мощности в течение 3 мин. (1), 5 мин. (2), 10 мин. (3), и продукта термообработки ГА (4).

Результатом воздействия СВЧ в ходе синтеза ОМК ГА/МЦ является интенсификация процесса синтеза. Этот эффект сочетается с уменьшением размеров НКГА вдоль осей “с” и “а” при кратковременном (2 мин.) воздействии СВЧ и последующим удлинением НКГА при увеличении длительности (5, 10 мин.) воздействия СВЧ излучения (рис. 2).

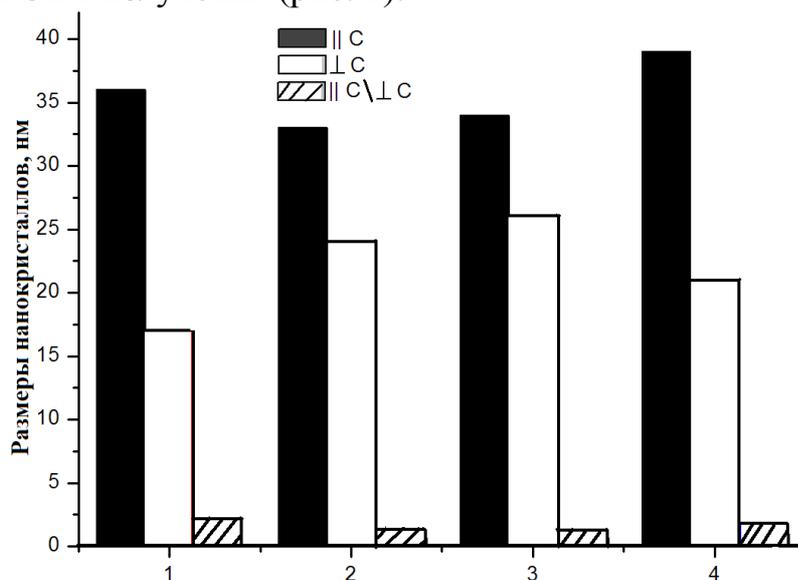


Рис. 2. Геометрические характеристики НКГА, синтезированных, синтезированный в биомиметических условиях (37°C, 3 ч) (1) и под воздействием СВЧ в продолжение 3 (2), 5 (3) и 10 (4) мин.

Эта информация может представлять интерес как для целей направленного синтеза ОМК ГА/биополимер с заданными размерами и морфологией НКГА, так и для учета возможного влияния СВЧ излучения на процессы метаболизма (в частности, процессы остеогенеза).

Работа выполнена при поддержке Фондов Президиума РАН (ФНМ) и ОХНМ РАН.

Библиографический список

1. Захаров Н.А., Калинин В.Т. *Фундаментальные науки – медицине. Биофизические медицинские технологии. Т. 2* / Под ред. А.И. Григорьева, Ю.А. Владимирова. – М.: МАКС Пресс, 2015. С. 145-169.

ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СПЕКЛ-СТРУКТУР ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

П.В. Павлов, А.Н. Малов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Для повышения эффективности оптических методов неразрушающего контроля при производстве и при эксплуатации композитных материалов предлагается использовать метод спекл-структур оптического излучения (МССОИ). В настоящее время известны работы отечественных и зарубежных ученых по использованию МССОИ для оценки параметров оптически-непрозрачных поверхностей [1-3], однако недостаточно еще исследована область точной взаимосвязи между параметрами шероховатостей и внутренней структуры полупрозрачных материалов от параметров зондирующего излучения, что является препятствием для применения МССОИ для контроля внутренней структуры композитных материалов. Для повышения чувствительности МССОИ при контроле структуры композитных материалов предлагается использовать в качестве зондированного волнового фронта вихревые лазерные пучки [4].

В ходе работы были определены соотношения между параметрами оптической системы и параметрами исследуемой поверхности, при которых эффективен метод корреляционной обработки картин. В работе представлены результаты моделирования оптической системы, реализующей способ неразрушающего контроля на основе использования МССОИ. Проанализированы пределы

применимости алгоритмов автокорреляционной обработки спекл-картин в зависимости от длины волны излучения и числа топологического заряда вихревого фронта.

Для метрологического использования оптических вихрей было выполнено описание скалярной и векторной дифракции когерентного света на спиральной фазовой пластинке в приближении тонкого оптического элемента приведено в [5]. Недавно были представлены результаты численного моделирования распространения когерентных скалярных вихревых пучков Лагерра-Гаусса сквозь турбулентную атмосферу [6]. Однако, процесс прохождения и отражения вихревых волновых фронтов через полупрозрачные шероховатые объекты, рассмотрен не был.

На рис.1 представлена принципиальная схема оптической системы, используемая в исследовании.

В качестве инструмента анализа параметров спекл-изображений, был использован программный комплекс автокорреляционной обработки [7].

В качестве критерия оценивания параметров контролируемого образца использовался интервал корреляции спекл-изображения. Установлено, что с увеличением R_a поверхности происходит уменьшение интервала корреляции спекл-изображения, причем при одних и тех же значениях параметров R_a величина интервала корреляции при использовании вихревого волнового фронта меньше, чем при использовании плоского.

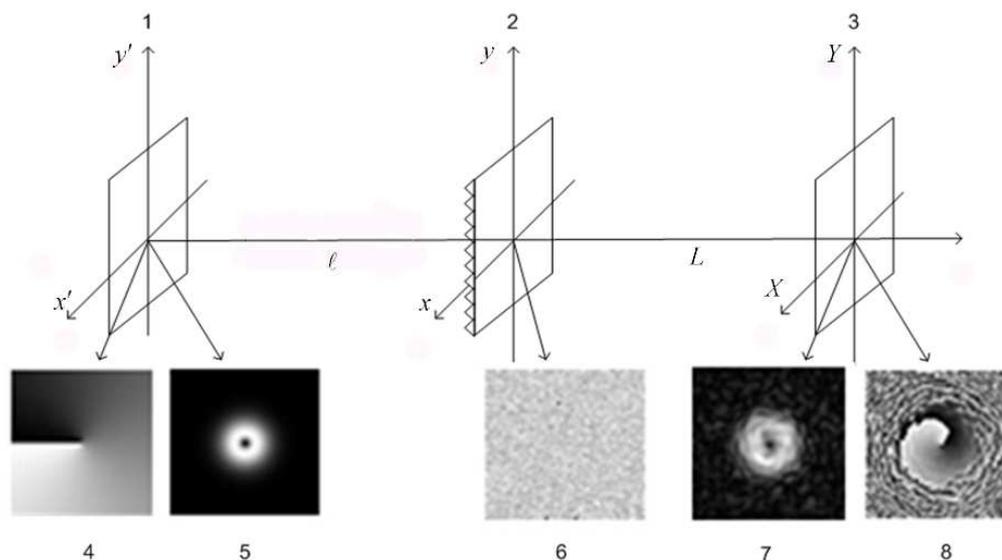


Рис. 1. Схема оптической системы с пропусканием вихревого фронта через композит. 1 - плоскость ДОЭ, 2- исследуемый объект, 3 - плоскость регистрации, 4 - распределение фазы после прохождения ДОЭ, 5- распределение амплитуды пучка непосредственно за ДОЭ, 6 - поверхность образца, 7 - спекл-картина в плоскости регистрации, 8 - пространственное распределение фазы в плоскости регистрации

В ходе моделирования проведено исследование влияния величины числа топологического заряда ρ вихревого фронта для случая отражения излучения от контролируемого образца.

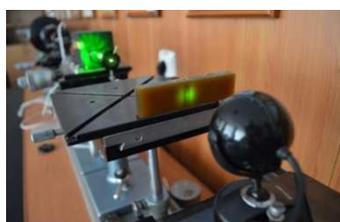
В таблице 1 представлены значения интервалов корреляции спекл-картин отражённого вихревого волнового фронта с различным числом топологического заряда для различных значений R_a . Установлено, что чувствительность МССОИ увеличивается приблизительно на 10%, 30% и 70% соответственно при 1, 2 и 3 зарядах волнового поля [8].

Таблица 1. Значения $R_{кор}$ для схем отражения при различных ρ

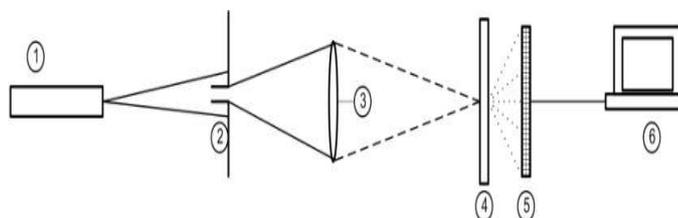
R_a , мкм	$R_{кор}$, мкм			
	плоский фронт	$\rho=1$	$\rho=2$	$\rho=3$
0,2	14,88	13,98	11,76	8,04
1	12,426	11,43	9,49	7,24
2	3,422	3,07	2,62	2,18

В ходе эксперимента было выполнено исследование МССОИ для дефектоскопического контроля элементов лопасти несущего винта вертолета МИ-28Н. В качестве тестовых образцов использовались заготовки из композитного материала – препрег стеклонить ВППС-7 со связующим ЭДТ-10П. Каждый образец имел определенную толщину, 8 мм и 12 мм соответственно. В качестве дефектов служили сквозные отверстия в торце образцов диаметром 2, 3, и 4 мм.

В ходе эксперимента каждый из образцов подвергался зондированию (рис.2), сначала неповрежденная часть, затем излучение пропускали через участки с дефектами, диаметр которых составлял 2, 3 и 4 мм. Зарегистрированные на матрице фотокамеры спекл-картины распределения интенсивности прошедшего лазерного излучения также подвергались автокорреляционной обработке.



а)



б)

Рис. 2 Внешний вид а) и схема установки б) используемой в эксперименте 1 – лазер SLM-417; 2 – диафрагма; 3 – линза; 4 – образец из композитного материала; 5 – камера SDU-415C; 6 – вычислительное устройство

По полученным экспериментальным данным (Таблица №2) было установлено, что при увеличении размера дефекта значение величины интервала корреляции увеличивается, а ширина энергетического спектра уменьшается [9].

Таблица 2. Результаты эксперимента

	толщина образца 8 мм		толщина образца 12 мм	
	интервал корреляции, мкм	ширина энергетического спектра, мкм	интервал корреляции, мкм	ширина энергетического спектра, мкм
Без дефекта	0,44	0,32	0,48	0,34
2 мм	1,03	0,318	0,52	0,335
3 мм	68,72	0,315	0,58	0,331
4 мм	87,66	0,31	0,71	0,330

Результаты исследований могут быть использованы при обосновании тактико-технических требований для разработки устройств неразрушающего контроля, принцип действия которых основан на использовании МССОИ.

Библиографический список

1. *Pino A. O., Pladellorens J., Colom J. F.* Method of measure of roughness of paper based in the analysis of the texture of speckle pattern // Proc. of SPIE. 2010. V. 73871W-1.
2. *Mukhurov N. I., Khilo N. A., Maschenko A. G.* A speckle-photometry method of measurement of thermal diffusion coefficient of thin multilayer and nanoporous structures // Proc. of SPIE. 2010. V. 738711-1.
3. *Кульчин Ю. Н., Витрик О. Б., Камшилина А. А., Ромашко Р. В.* Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей. – М.: Физматлит, 2009. 288 с.
4. *Котляр В. В., Ковалева А. А.* Вихревые лазерные пучки. – Самара: «Новая техника», 2012. 248 с.
5. *Петров Н. В., Павлов П. В., Малов А. Н.* Численное моделирование распространения и отражения оптического вихря методами квантовой теории дифракции // Квантовая электроника. 2013. Т. 43, № 6. С. 582 – 587.
6. *Rao R.* Statistics of phase singularity of a speckle field in atmospheric turbulence. Speckle 2010: Optical Metrology // Proc. of SPIE V. 73871H-1.
7. *Павлов П. В., Горюнов А. Е.* Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля авиационных деталей // Труды МАИ. 2015. № 80. С. 21.
8. *Павлов П. В., Петров Н. В., Горюнов А. Е., Малов А. Н.* Контроль композитных материалов с применением вихревых лазерных пучков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58, № 11/3. С. 179 – 182.
9. *Павлов П. В., Горюнов А. Е., Петров Н. В.* Неразрушающий контроль композитных материалов по анализу параметров цифровой спекл-фотографии // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2014. Т. 645. С. 132 – 135.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОАЛМАЗОВ С АЗОТИСТЫМИ ОСНОВАНИЯМИ ДНК: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СОЕДИНЕНИЙ

А.Н. Бокарев, И.Л. Пластун, Н.С. Зенкин

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А

E-mail: inna_pls@mail.ru, andreybokarev@mail.ru

В настоящее время множество исследований в различных сферах науки связано с изучением биомолекул и их взаимодействия с углеродными наночастицами. В частности, существенный интерес представляет возможность создания биомаркеров, адсорбентов и носителей лекарств на основе комбинированных соединений азотистых оснований ДНК и наноалмазов.

Основной целью представленной работы является исследование методами молекулярного моделирования оптических параметров взаимодействия азотистых оснований ДНК с углеродными наночастицами на примере расчёта ИК-спектров комплементарной пары аденин-тимин и производных адамантана.

Азотистые основания, как известно, это органические соединения, являющиеся основными структурными составляющими ДНК и РНК. В проводимых исследованиях были рассмотрены два основания – аденин ($C_5H_5N_5$) и тимин ($C_5H_6N_2O_2$), которые образуют комплементарную пару (рис.1б). Данные соединения играют важную роль в работе живых организмов, выполняя множество биохимических функций.

Адамантан представляет собой один из видов наноалмазов, а именно насыщенный трициклический мостиковый углеводород с формулой $C_{10}H_{16}$, обычно получаемый методом детонационного [1] или лазерного [2] синтеза. На текущий момент создано множество различных производных адамантана, которые нашли большое практическое применение в медицине, технике, материаловедении и других сферах. На основе адамантана разработаны полимерные материалы и композиты с улучшенными эксплуатационными свойствами, термостабильные смазочные материалы.

Ранее достаточно подробно было исследовано влияние водородных связей на колебательные спектры комплементарной пары аденин-тимин [3] и спектральные характеристики адамантана [2], но исследований, посвящённых их взаимовлиянию, ранее не проводилось.

Нами рассматривались соединения производных адамантана, получаемых путём внедрения в его молекулярную структуру шести карбоксильных групп $COOH$ (рис.1, а) и комплементарной пары аденин-тимин (рис.1, б). Структура и рассчитанные ИК-спектры этих соединений показаны на рис.1. Буквами на спектрах обозначены резонансы, соответствующие колебаниям тех или иных связей.

Для расчётов был использован программный комплекс Gaussian 09, который традиционно используется для решения задач молекулярного моделирования в различных сферах вычислительной физики и химии.

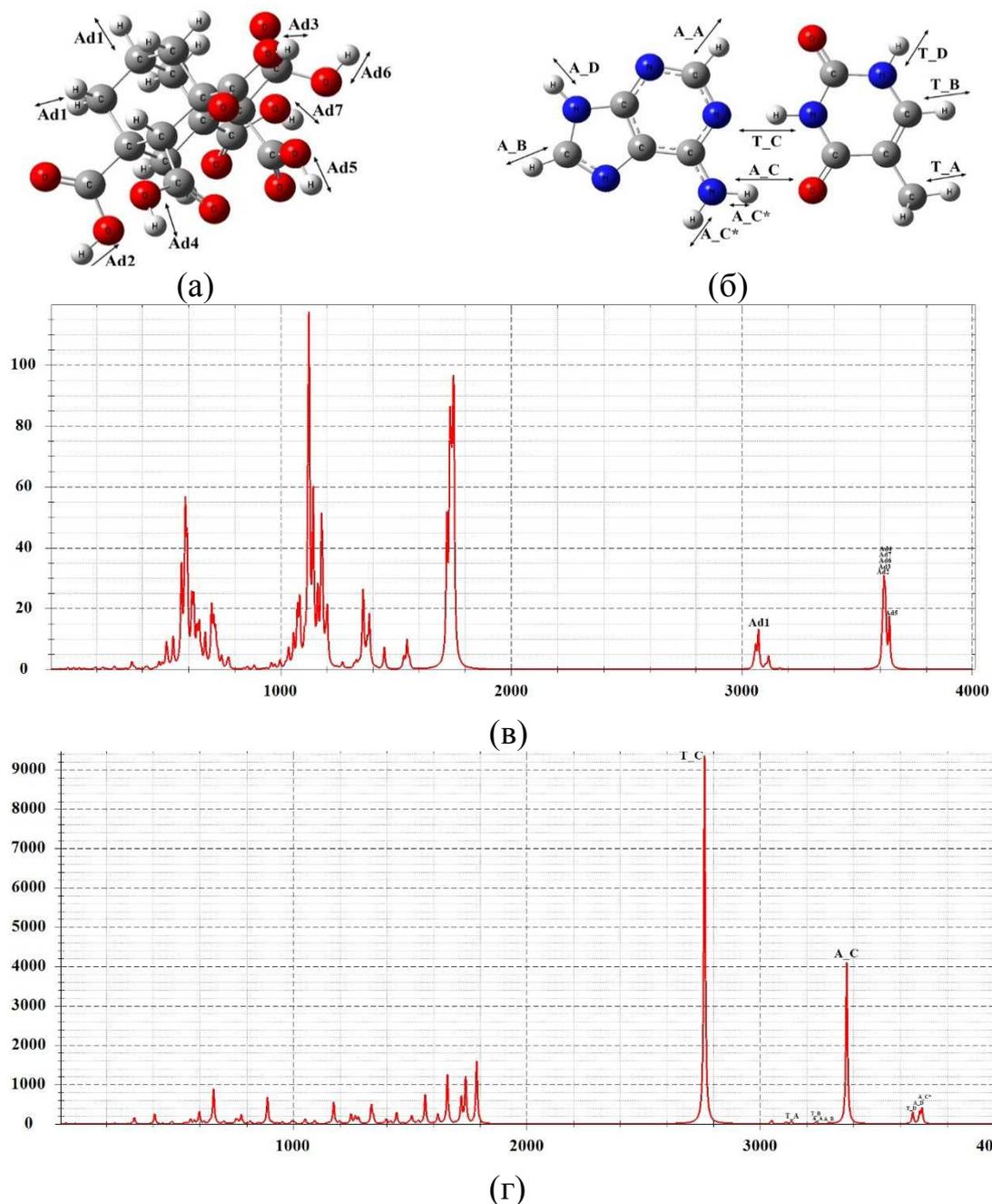


Рис.1. Структура адамантана, обогащённого карбоксильной группой COOH (а) и комплементарного соединения аденин-тимин (б) и ИК-спектры этих соединений: (в) адамантана, (г) аденина-тимина.

Расчёт спектров соединений выполнялся на основе метода B3LYP с использованием базисного набора 6-31G, в котором атомные орбитали электронов внутренней оболочки аппроксимируются шестью гауссовыми функциями, $M = 6$, а орбитали валентной оболочки описываются соответственно тремя ($N = 3$) и одной ($P = 1$) гауссовой функцией.

Взаимодействие адамантана и комплементарной пары аденин-тимин хорошо заметна на ИК-спектре этого соединения, представленном на рис. 2, где буквами обозначены связи и соответствующие им резонансы ИК- спектра.

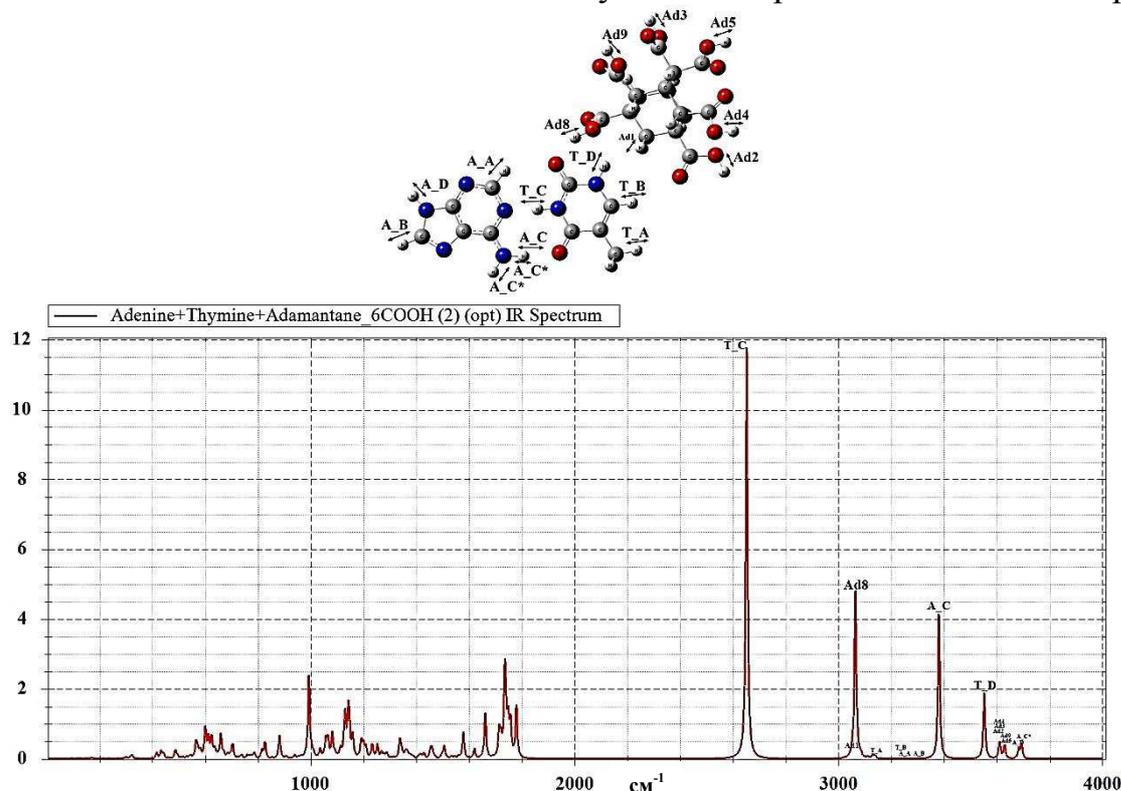


Рис.2. Структура и ИК-спектр соединения адамантан – аденин - тимин

На ИК-спектре хорошо заметны характерные для наноалмазов валентные колебания двойной связи $C = O$ карбоксильной группы на частоте 1736 см^{-1} , а также появление новых резонансных пиков в высокочастотной области, вызванных колебаниями водородной связи, и смещение частот валентных колебаний в низкочастотной области.

Библиографический список

1. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы деонационного синтеза: свойства и применение // Успехи химии. 2001. Т.70, №7. С.687–708.
2. Байдакова М.В., Кукушкина Ю.А., Ситникова А.А. и др. Структура наноалмазов, полученных методом лазерного синтеза//Физика твердого тела. 2013. Т.55, №8. С.1633–1639.
3. Тен Г.Н., Нечаев В.В., Панкратов А.Н. и др. Влияние водородной связи на структуру и колебательные спектры комплементарных пар оснований нуклеиновых кислот. II. Аденин - тимин //Журнал структурной химии». 2010. Т. 51, № 5. С. 889-895.

ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БИОДЕГРАДАЦИИ МИКРОТРУБОК ХИТОЗАНА

Т.С. Бабичева^{1,2}, Н.О. Гегель¹, А.Б. Шиповская^{1,2}

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

¹ Образовательно-научный институт Наноструктур и биосистем

² Институт Химии

E-mail: tatyana.babicheva.1993@mail.ru

В настоящее время зондовые методы находят все большее распространение при исследовании биообъектов и биомиметических материалов. Например, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) позволяет с достаточной точностью получить информацию о морфологии и свойствах таких материалов. Перспективным полимером для создания биомиметиков является хитозан (ХТЗ). На его основе получают 3D стержни (штифты) [1], гибридные органо-неорганические гидрогели [2] и др. Актуально и создание на его основе микро-трубочек – аналогов капиллярных сосудов и нервов.

Ранее в работах [3, 4] нами описано получение и механизм формирования полых цилиндрических структур (микро-трубок) из растворов ХТЗ. Показано, что они могут стать перспективным материалом для создания биоразлагаемых протезов кровеносных сосудов. Микро-трубка в данном случае выступает в качестве полого каркаса, на поверхности которого адгезируют и пролифируют фибробласты. При этом полимерный каркас биорезорбирует естественным метаболическим путем под действием ферментов макроорганизма. Из литературы известно, что биорезорбция материалов на основе ХТЗ, например пленок, реализуется в присутствии неспецифических ферментов [5, 6], в частности лизоцима (мурамидазы) [7].

Целью работы явилось исследование возможности использования СЭМ для оценки биодegradации *invitro* микро-трубок ХТЗ в ферментативной среде лизоцима.

Для моделирования процесса биодegradации микро-трубки ХТЗ помещали в раствор иммобилизованного фермента лизоцим (ООО «Медиген», РФ) концентрации $C = 2$ мг/мл в фосфатном буфере ($pH = 7.4$). В качестве контроля использовали раствор фосфатного буфера без фермента. Все используемые в эксперименте растворы были стерилизованы в автоклаве при температуре $120^{\circ}C$ и давлении 0.11 МПа в течение 45 мин. Модельную и контрольную системы выдерживали в термостате при температуре $37^{\circ}C$ в течение всего эксперимента. Выемку образцов микро-трубок для проведения дальнейших исследований проводили каждые 30 суток в течение 6 месяцев.

Морфологию поверхности микро-трубок ХТЗ исследовали методом СЭМ. Фотографии получали на микроскопе MIRA\\LMU (Tescan, Чехия) при напряжении 15 кV и проводящем токе 400 pA. Пробо-подготовку проводили следую-

шим образом: образец вынимали из ферментативной среды и заливали хлоргексидином на 10 мин. Далее отмывали стерильной водой, разрезали вдоль и опускали в раствор 96% этилового спирта на 30 мин. Затем сушили на воздухе при комнатной температуре в течение 24 часов. На полученный образец напыляли слой золота толщиной 5 нм на установке K450X Carbon Coater (Германия).

Внешняя и внутренняя поверхности стенки исходных образцов микроотрубок, взятых для проведения эксперимента, визуальнo гладкие без видимых дефектов. В процессе выдержки образцов как в фосфатном буфере, так и в ферментативной среде наблюдается изменение морфологии поверхности. Типичные СЭМ фотографии поверхности стенки испытываемых микроотрубок приведены на рисунке.

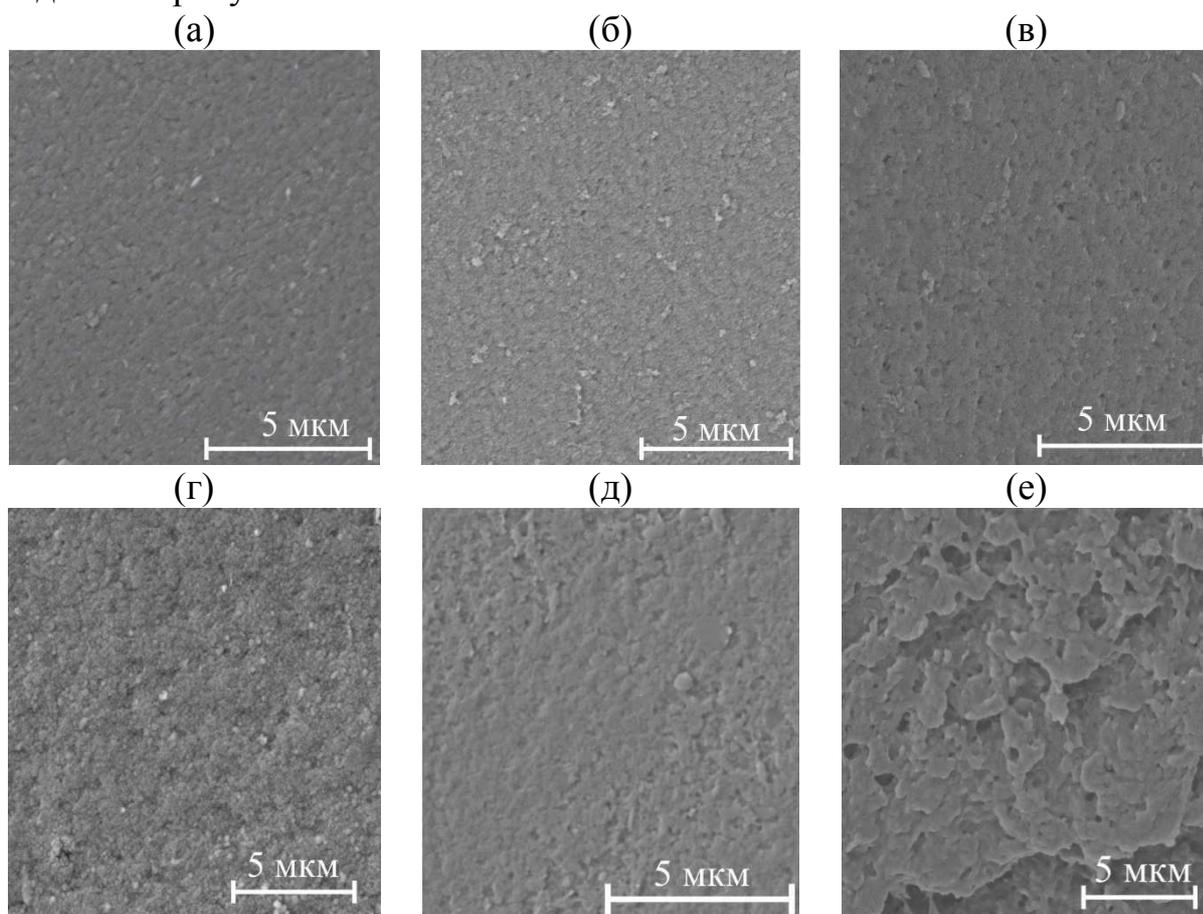


Рис. Фотографии СЭМ внутренней поверхности микроотрубки ХТЗ, выдержанной в течение 120 (а, г), 150 (б, д) и 180 (в, е) сут в фосфатном буфере (а-в) и в ферментативной среде лизоцима (г-е) при температуре 37°C.

Как видно, при выдерживании образца микроотрубки в фосфатном буфере (контрольная система) в течение 180 сут серьезных изменений в структуре поверхности стенки не наблюдается (рис. а-в). В процессе выдержки фиксируется лишь образование микропор (рис. в).

Для микроотрубки, находившейся в ферментативной среде лизоцима, также характерно образование микропор (рис. г-е). Однако, уже на 120 сут выдер-

живания образца в данной среде на его поверхности формируются четко выраженные дефекты (рис. г). На 150 сут эксперимента возрастает размер микропор и дефектов, а также увеличивается их суммарное количество по всей поверхности стенки испытуемого образца (рис. д). По истечении 180 сут микрорельеф поверхности микротрубки приобретает ярко выраженную рыхлую структуру (рис.1 е). В работе [5] было показано, что под действием фермента лизоцима материалы на основе ХТЗ подвергаются биодеструкции вследствие разрыва β -(1-4)-гликозидной связи. Можно предположить, что данный факт и приводит к изменению в морфологии микротрубок хитозана в процессе их выдерживания в ферментативной среде лизоцима.

Таким образом, метод сканирующей электронной микроскопии позволяет визуализировать и фиксировать изменения морфологии поверхности в процессе биодеструкции полимерного материала под действием фермента.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта № 16-33-00953 «Научные основы получения биodeградируемых 3D структур из природных полисахаридов для создания аналогов кровеносных сосудов».

Библиографический список

1. Wang Z., Hu Q., Ca L. Chitin fiber and chitosan 3D composite rods // Int. J. Polym. Sci. 2010. ArticleID 369759.8 p.
2. Шадрина Е.В., Малинкина О.Н., Хонина Т.Г., Шиповская А.Б., Фомина В.И., Ларченко Е.Ю., Попова Н.А., Зырянова И.Г., Ларионова Л.П. Исследование процесса образования и фармакологической активности кремнийхитозансодержащих глицерогидрогелей, полученных методом биомиметической минерализации // Изв. Академ. наук. Сер. Хим. 2015. №7. С. 1633-1639.
3. Gegel N.O., Shipovskaya A.B., Vdovykh L.S., Babicheva T.S. Preparation and properties of 3D chitosan microtubes // J. Soft Mat. 2014. Article ID 863096. 9 p.
4. Babicheva T.S., Gegel N.O., Shipovskaya A.B. Influence of the salting-out agent nature on the strength properties of chitosan microtubes // J. Nat. Sci. Sustainable Techn. 2015. V. 9, N. 2. P. 285-295.
5. Kean T., Thanou M. Biodegradation, biodistribution and toxicity of chitosan // Adv. Drug Delivery Rev. 2010. V. 62. P. 3-11.
6. Кулиш Е.И., Чернова В.В., Володина В.П., Колесов С.В. Биodeградация пленочных полимерных покрытий на основе хитозана // Вест. Башкирск. ун-та. 2008. Т. 13, № 1. С.23-26.
7. Zhang L., Dou S., Li Y., Yuan Y., Ji Y., Wang Y., Yang Y. Degradation and compatibility behaviors of poly(glycolic acid) grafted chitosan // Mater. Sci. Eng. C. 2013. N. 33. P. 2626-2631.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР ГРАФЕН-ФОСФОЛИПИД

О.Е. Глухова, Г.В. Савостьянов, Д.С. Шмыгин

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: shmygin.dmitriy@gmail.com

В настоящее время вызывает большой интерес исследователей взаимодействие биологических молекул и углеродных наноструктур, что обусловлено возможностью использования последних в области биотехнологий [1]. Большой интерес вызывают системы, включающие в себя молекулы фосфолипидов, входящих в состав клеточных мембран [2, 3]. Для описания системы, состоящей из фосфолипидов и углеродных структур, можно воспользоваться различными методами и подходами. Так, к примеру, метод AMBER [4] может описать взаимодействие между атомами такой гибридной системы, но, во-первых, параметры, используемые для описания углеродных нанотрубок и графеновых листов, не позволяют удовлетворительно моделировать их механические свойства, а во-вторых — сам вид потенциала не позволяет моделировать ситуации, в которых должны произойти образования или разрывы химических связей. В свою очередь метод Бреннера [5, 6] позволяет моделировать углеродные наноструктуры с необходимой достоверностью, включая и ситуации с разрывом и образованием химических связей в этих системах.

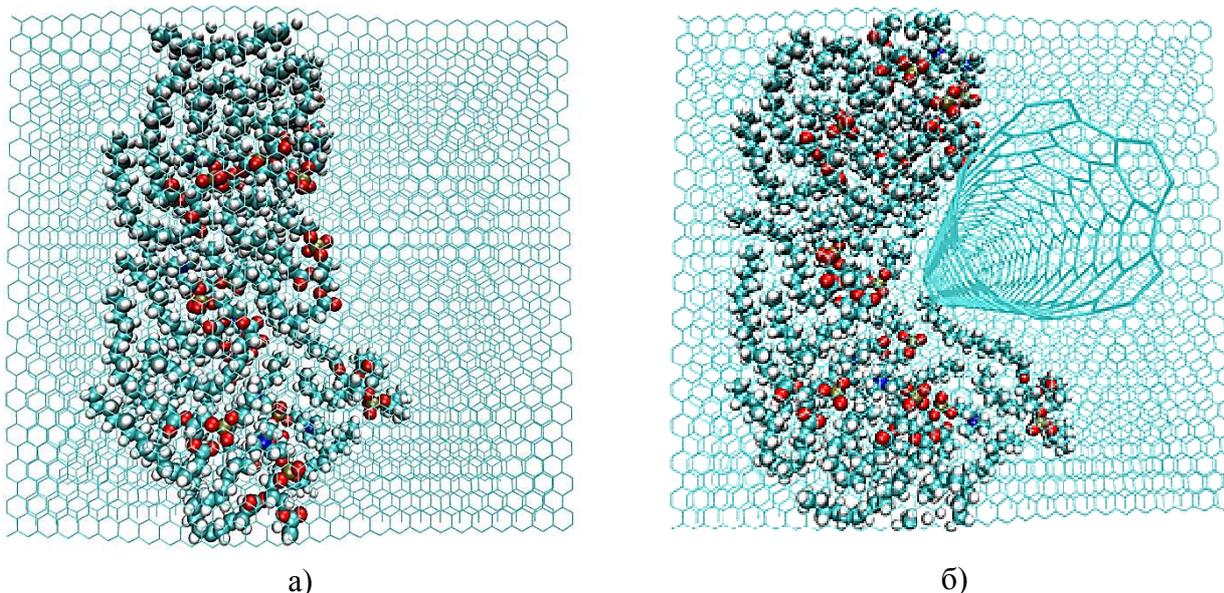


Рис. 1. а - Модель трехслойного композита (вид сверху); б - индентирование композитного материала, состоящего из графеновых слоев и молекул фосфолипида между ними

Была рассмотрена динамика поведения таких композитных систем различной конфигурации: с разным числом графеновых листов в их составе, а также проведено наноиндентирование трехслойной модели углеродной нанотрубкой, закрытой с одного конца. Скорость индентора составляла 10 м/с. На основе полученных данных были сделаны выводы о механических характеристиках фосфолипид-графеновых композитов представленной конфигурации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-офи_м №15-29-01025.

Библиографический список

1. *Ren J., Shen S., Wang D., Xi Z., Guo L., Pang Z., Qian Y., Sun X., Jiang X.* The Targeted Delivery of Anticancer Drugs to Brain Glioma by Pegylated Oxidized Multi-Walled Carbon Nanotubes Modified with Angiopep-2 // *Biomaterials*.2012. V. 33. P. 3324–3333.
2. *Lelimosin M., Sansom M.S.* Membrane Perturbation by Carbon Nanotube Insertion: Pathways to Internalization // *Small*.2013. V. 9. P. 3639–3646.
3. *Wallace E.J., Sansom M.S.* Blocking of Carbon Nanotube Based Nanoinjectors by Lipids // *Nano Lett.* 2008. V. 8. P. 2751-2756.
4. *Dickson, C.J., Rosso, L., Betz, R.M., Walker, R.C., Gould, I.R.* GAFFlipid: a General Amber Force Field for the accurate molecular dynamics simulation of phospholipid. // *Soft Matter*. 2012. V. 8. P. 9617-9627.
5. *Brenner D. W.* Empirical potential for hydrocarbons for use in simulating the chemical vapor deposition of diamond films // *Phys. Rev. B*. 1990. V. 42, N. 15. P. 9458-9471.
6. *Stuart J. S., Tutein A. B., Harrison J. A.,* A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions // *Journal of Chem. Phys.* 2000. V. 112, N. 14. P. 6472-6486.

ВЛИЯНИЕ МЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОЛОВНОГО МОЗГА

К.Е. Агандеева, И.Л. Пластун

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

E-mail: inna_pls@mail.ru, Ksenia-Agandeeva@rambler.ru

В настоящее время большой интерес вызывают исследования, посвященные расшифровке и анализу электроэнцефалограмм. Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) представляет собой запись электрической активности нейронов различных структур головного мозга, которая снимается при помощи электродов, прикрепленных к различным участкам головы пациента.

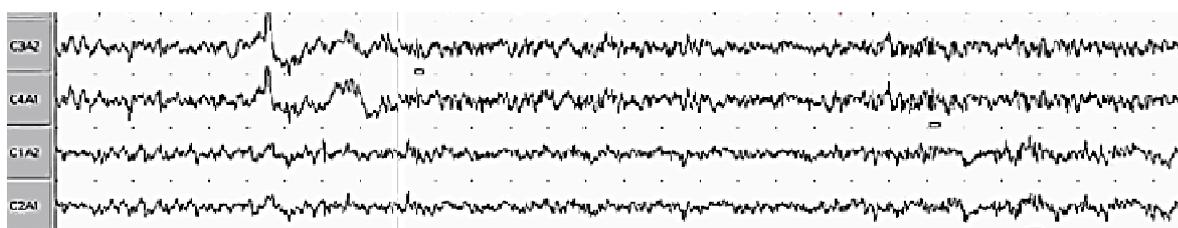
Исследованию электроэнцефалограмм посвящено большое количество работ в области биофизики. Как правило, в исследованиях ЭЭГ предлагаются различные методики нахождения опорных точек для выделения сигнала: на-

пример, методом усреднения на фоне шумов большой амплитуды без использования внешней информации о моментах его возникновения [1]. Также описываются и анализируются записи биомагнитной активности мозга в рамках задачи локализации источников биомагнетизма и диагностики патологий (см., например, [2], где проводится диагностика болезни Паркинсона на основе системы спектральных методов описания сигнала ЭЭГ). Во многих работах электрическая активность головного мозга исследуется на основе детального вейвлет-анализа, как, например, в [3], где предрасположенность к абсанс-эпилепсии у крыс исследуется на основе результатов, зарегистрированных во время сна.

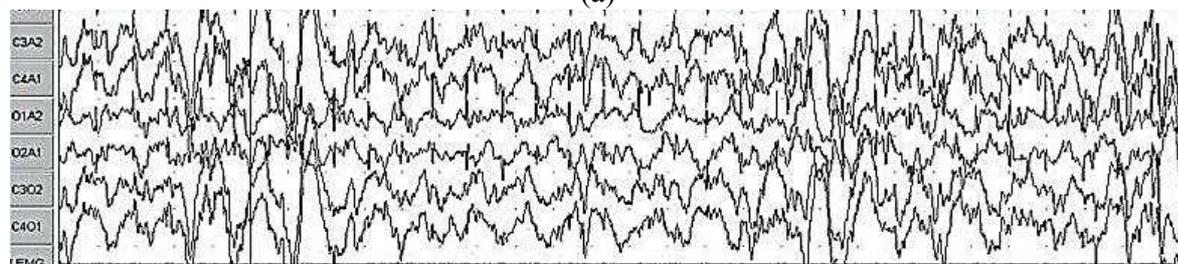
Однако следует отметить, что эти и другие исследования в области анализа энцефалограмм, в первую очередь, посвящены рассмотрению различных патологических состояний головного мозга, а исследований функциональной активности и возможной предрасположенности к патологиям проводится сравнительно немного.

В настоящей работе внимание сосредоточено на исследовании ЭЭГ в случае различных характерных состояний человеческого организма. Для ранней диагностики склонности к патологическим состояниям и исследований корреляций между работой нервной системы и головного мозга весьма интересно установить связь между электроэнцефалограммой головного мозга и миограммой пациента. Миограмма (ЭМГ) представляет собой запись электрической активности скелетных мышц, выполненная посредством специального прибора – электромиографа. Учитывая небольшое число подобных исследований, задача вычленения сигнала ЭМГ из ЭЭГ и выявления корреляции этих сигналов является на сегодняшний день достаточно актуальной.

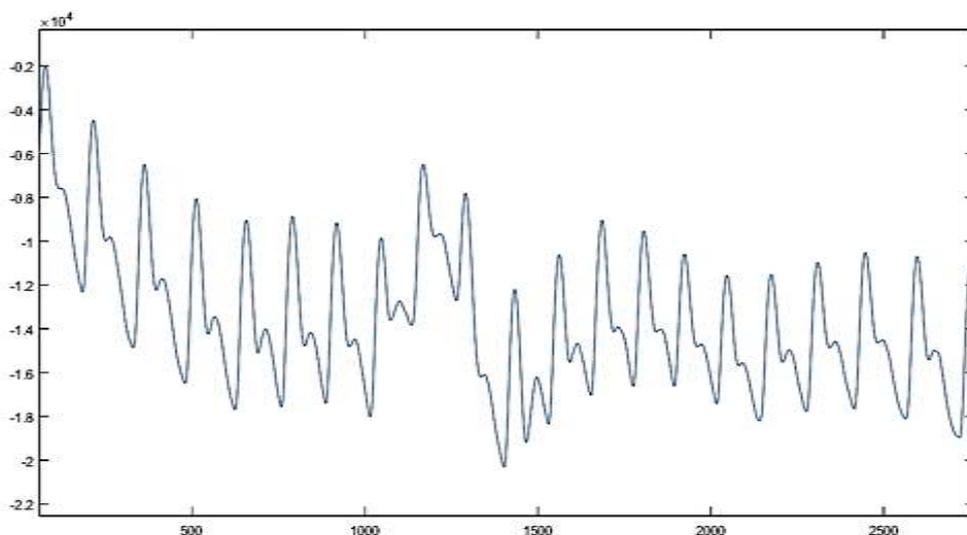
В работе рассматриваются возможные характерные зоны, а также предлагается использование адаптивной фильтрации для вычленения взаимовлияющих сигналов.



(a)



(б)



(в)

Рис. 1. Электроэнцефалограммы во время фазы быстрого (а) и медленного (б) сна и миограмма (пульсограмма) здорового человека (в), снятая с пальца во время сна

Особенность применения методов адаптивной фильтрации состоит в том, что адаптивный фильтр обладает способностью автоматически перестраивать параметры. Также в процессе синтеза такого рода фильтра практически не участвуют априорные сведения о свойствах сигнала и помехи [4]. Кроме того, имеется возможность объединения фильтров с различными параметрами. Все перечисленные особенности адаптивного фильтра могут быть успешно применены для выделения характерных областей в ЭЭГ и ЭМГ различных органов тела и сопоставления типичных активностей с их реализацией на уровне сигналов головного мозга.

Библиографический список

1. Панкратова Н.М., Устинин М.Н., Линас Р.Р. Обнаружение патологической активности головного мозга по данным магнитной энцефалографии // Математическая биология и биоинформатика. 2013. Т. 8, № 2. С.679 – 690.
2. Дергузов А.В., Махортых С.А., Семечкин Р.А. Комплексная диагностика Паркинсонизма по данным магнитной энцефалографии //Электронный журнал «Исследовано в России». 2006. Т. 65. С. 646–659.
3. Грубов В.В., Овчинников А.А., Ситникова Е.Ю. Вейвлетный анализ сонных веретен на ЭЭГ и разработка метода их автоматической диагностики. // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т.19, №4. С.91-104.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1989. 440 с. С. 274 – 307.

ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТКАНИ ПОЧЕК С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ

Н.М. Исаева, П.А. Путин, Т.И. Субботина*

Тульский государственный университет

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого

В ряде работ, посвящённых воздействию крайненизкочастотных вращающихся магнитных полей (ВМП) и импульсных бегущих магнитных полей (ИБМП) на ткани млекопитающих успешно использовался информационный анализ. В частности, было осуществлено сравнение информационных характеристик морфометрических признаков почечных клубочков и канальцев [2-4]. Также был проведен корреляционный и регрессионный анализы между значениями относительной информационной энтропии h , полученной для морфометрических признаков почечных клубочков, и морфометрическими признаками почечных клубочков, такими как площадь цитоплазмы капсулы, площадь ядер капсулы, площадь цитоплазмы капиллярной сети, площадь ядер капиллярной сети, площадь полости клубочка [1]. Настоящее исследование подтверждает выводы, сделанные в рассмотренных выше работах. Оно осуществлялось в пяти группах, каждая из которых включала в себя по 15 взрослых мышей линии C57/Bl6 обоих полов:

1-я группа – контрольная группа интактных мышей;

2-я группа – экспериментальная группа мышей, которая подверглась воздействию ИБМП с длительностью импульса 0,5 с;

3-я группа – экспериментальная группа мышей, которая подверглась воздействию ВМП с частотой 6 Гц, направление вращения поля вправо, величина магнитной индукции 4 мТл, в сочетании с переменным магнитным полем (ПеМП) с частотой 8 Гц, при величине магнитной индукции 4 мТл;

4-я группа – экспериментальная группа мышей, которая подверглась воздействию ПеМП с частотой 8 Гц при величине магнитной индукции 4 мТл;

5-я группа – экспериментальная группа мышей, которая подверглась воздействию ВМП с частотой 6 Гц, направление вращения поля вправо, величина магнитной индукции 0,4 мТл, в сочетании с ПеМП с частотой 8 Гц, при величине магнитной индукции 0,4 мТл.

Во всех рассмотренных выше группах вычислялись следующие информационные характеристики: информационная емкость H_{\max} , т.е. максимальное структурное разнообразие системы, информационная энтропия H , информационная организация S . Кроме того, вычислялись относительная информационная энтропия h как характеристика неустойчивости функциональной системы, и коэффициент относительной организации системы R (коэффициент избыточности).

Рассмотренные выше значения коэффициентов определялись в пяти группах для следующих морфометрических признаков почечных канальцев и по-

чечных клубочков: площадь цитоплазмы капсулы, площадь ядер капсулы, площадь цитоплазмы капиллярной сети, площадь ядер капиллярной сети, площадь полости клубочка, площадь цитоплазмы канальцев, площадь ядер канальцев и площадь просвета канальцев. Для всех групп значение информационной ёмкости H_{\max} составляло $3,000 \pm 0,000$ бит.

Таблица 1. Информационные характеристики морфометрических признаков почечных клубочков и канальцев

Группа	H (бит)	S (бит)	h	R (%)
Группа 1	$2,659 \pm 0,021$	$0,341 \pm 0,021$	$0,886 \pm 0,007$	$11,373 \pm 0,684$
Группа 2	$2,727 \pm 0,028$	$0,273 \pm 0,028$	$0,909 \pm 0,009$	$9,089 \pm 0,921$
Группа 3	$2,519 \pm 0,036$	$0,481 \pm 0,036$	$0,840 \pm 0,012$	$16,026 \pm 1,201$
Группа 4	$2,525 \pm 0,049$	$0,475 \pm 0,049$	$0,842 \pm 0,016$	$15,835 \pm 1,639$
Группа 5	$2,463 \pm 0,033$	$0,537 \pm 0,033$	$0,821 \pm 0,011$	$17,892 \pm 1,095$

Наименьшие средние значения информационной энтропии H и относительной информационной энтропии h , были получены в группе 3 ($2,519 \pm 0,036$ бит и $0,840 \pm 0,012$) и группе 5 ($2,463 \pm 0,033$ бит и $0,821 \pm 0,011$). Это группы мышей, которые подверглись воздействию ВМП с частотой 6 Гц и величиной магнитной индукции соответственно 4 мТл и 0,4 мТл, в сочетании с ПеМП с частотой 8 Гц, при величине магнитной индукции соответственно 4 мТл и 0,4 мТл. Для этих групп получены наибольшие значения информационной организации системы S и коэффициента относительной организации системы R . Для группы 3 значения S и R равны $0,481 \pm 0,036$ бит и $16,026 \pm 1,201$ %, а для группы 5 они составляют $0,537 \pm 0,033$ бит и $17,892 \pm 1,095$ %.

Наибольшие средние значения показателей H и h найдены для группы 2 мышей, которая подверглась воздействию ИБМП с длительностью импульса 0,5 с ($2,727 \pm 0,028$ бит и $0,909 \pm 0,009$). Соответственно для этой группы получены наименьшие средние значения S и R , которые равны $0,273 \pm 0,028$ бит и $9,089 \pm 0,921$ %.

Для информационных показателей, таких, как информационная энтропия H , информационная организация S , относительная информационная энтропия h и коэффициент относительной организации системы R , во всех группах больных были найдены также минимум, максимум, размах вариации, т.е. разность между значениями максимума и минимума.

Максимум информационной энтропии H и относительной информационной энтропии h достигает наименьшего значения в группе 5 ($2,669$ бит и $0,890$). Наибольшие значения максимума показателей S и R получены в группе 4 ($0,999$ бит и $33,3$ %). Минимум показателей H и h достигает наименьшего значения в группе 4 ($2,001$ бит и $0,667$). Наибольшие значения минимума информационной организации системы S и коэффициента избыточности R получены в группе 5, они составляют $0,331$ бит и $11,04$ %. Наименьшие значения размаха для H , S , h и R достигаются в контрольной группе. Они равны соответственно $0,332$ бит, $0,332$ бит, $0,111$ и $11,1$ %.

Таким образом, наименьшие значения информационной энтропии и наибольшие значения коэффициента относительной организации системы были получены в группах 3, 4 и 5, характеризующихся развитием тяжёлых патологических изменений в тканях почек. Это позволяет сделать вывод о возможности формирования устойчивого состояния в условиях необратимого патологического процесса.

Библиографический список

1. *Исаева Н.М.* Динамика информационных характеристик тяжести патоморфологических изменений при воздействии на организм вращающихся и импульсных бегущих магнитных полей. - Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2014. №1. С.178.
2. *Исаева Н.М., Савин Е.И., Субботина Т.И., Яшин А.А.* Анализ патоморфологических изменений при воздействии на организм магнитных полей с позиции теории информации// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. №1-2. С.283-284.
3. *Исаева Н.М., Савин Е.И., Субботина Т.И., Яшин А.А.* Биоинформационный анализ последствий воздействия магнитных полей на процессы жизнедеятельности млекопитающих// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. №1-2. С.284-286.
4. *Исаева Н.М., Савин Е.И., Субботина Т.И., Яшин С.А.* Информационный анализ тяжести патоморфологических изменений при воздействии на организм вращающихся и импульсных бегущих магнитных полей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. №1. С.85-86.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ КРЫС В ОТДАЛЕННОМ ПЕРИОДЕ ПОСЛЕ ТЕХНОГЕННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Э. Б. Александрова

Государственный Научный Центр РФ
Институт Медико-биологических проблем РАН, г. Москва
E-mail: elona6@yandex.ru

На сегодняшний день можно считать доказанным, что одним из основных и информативных показателей действия различных неблагоприятных факторов окружающей среды на организм являются параметры периферической крови [1, 3, 4, 5].

Однако, до сих пор не было обнаружено какой-либо специфичности изменений исследуемых показателей, позволяющих в отсутствие данных дозиметрии однозначно диагностировать действие электромагнитного фактора.

Несмотря на то, что в отечественной и зарубежной научной литературе опубликовано значительное количество трудов о влиянии физических факторов электромагнитной природы на показатели системы кроветворения [1- 5], в этих работах содержатся противоречивые данные.

Поэтому поиск диагностических критериев изменения значений показателей периферической крови позволяющих объективно оценить состояние пострадавших в случае возникновения чрезвычайной ситуации, связанной с электромагнитным воздействием, является актуальной проблемой современной медицины.

Цель исследования – изучение корреляции показателей периферической крови в отдаленном периоде после техногенных комбинированных воздействий электромагнитных излучений.

Материалы и методика

Для реализации задачи исследования, изучения изменения поведенческих функций крыс, а также изучения влияния мощного электромагнитного излучения на изменение морфологических и гематологических показателей периферической крови, было проведено 3 цикла эксперимента в каждой из которой было использовано по 36 беспородных крыс-самцов весом 150-200г, которые были поделены на опытные и контрольные группы, группы животных формировались в зависимости от показателей исходной реактивности организма. Исходная реактивность организма экспериментальных животных оценивалась по эмоционально-поведенческим реакциям.

При формировании экспериментальных групп животных исходная реактивность организма оценивалась по эмоционально-поведенческим реакциям.

В качестве источника техногенных комбинированных воздействий использовалось: Опыт №1 - мощное КВ радиоизлучение (осуществлялось в диапазоне 4-10 МГц, с амплитудной модуляцией от 8 до 10 Гц), Опыт №2 – комбинированное воздействие с наличием сопутствующих световых, звуковых и химических факторов, Опыт №3 – комбинированное воздействие без наличия сопутствующих (звуковых и химических факторов). В нашем эксперименте техногенное комбинированное воздействие ЭМИ, осуществлялось со следующими интенсивностями Опыт №1 (80 В/м); Опыт №2 (100 В/м); Опыт №3 (более 100 В/м).

Во время проведения эксперимента параметры окружающей среды контролировались с помощью прибора «ТКА-ПКМ» (освещенность в видимом диапазоне спектра, температура воздуха, относительная влажность), радиационный фон с помощью дозиметра ДКУ-02У «Арбитр», параметры электромагнитного поля измерялись при помощи измерителя уровней электромагнитных излучений ПЗ-31.

Кровь для исследований гематологических показателей в отдаленном периоде после экстремального воздействия комбинированных световых, звуковых и эми факторов, отбиралась из хвостовой вены на 3-й; 7-й, 10-й, 14 и 20-й день после облучения, в одноразовые пластиковые пробирки с антикоагулянтом

(ЭДТА). Одновременно при взятии крови из хвостовой вены каждого животного опытной и контрольной групп, проводилось изготовление мазков. Отобранные пробы в течении 4-х часов доставлялись в клинично-диагностическую лабораторию и анализировался с использованием автоматизированного гематологического анализатора МЕК-6400J/К, данные исследования проводились с участием специалиста врача-гематолога, доктора медицинских наук, профессора Ивановой Л.А.

Результаты и обсуждение

При анализе полученных результатов проведенных экспериментов выявлено, что в условиях воздействия мощным КВ радиоизлучением, наблюдается достоверное изменение динамики гематологических показателей периферической крови с явно выраженным проявлением к 10 дню после окончания воздействия. В экспериментальной группе (Опыт №1) по сравнению с контролем обнаружены статистически значимые снижения уровня гемоглобина, до 44 % (с максимальным проявлением к 20 дню после воздействия), снижение количества лейкоцитов на 62,4 %, эритроцитов на 50,8%. Динамика основных показателей периферической крови (гемоглобина, лейкоцитов и эритроцитов) оценивалась по сравнению % отношения полученного значения каждого показателя от исходного (базового) показателя. В качестве базового принималось значение показателей периферической крови контрольной группы (ложнооблученной группы экспериментальных животных), полученные на 3-й, 7-й, 10-й, 14-й и 20-й день после воздействия.

На 20е сутки после воздействия мощным КВ радиоизлучением обнаружено более выраженное изменение исследуемых показателей периферической крови. Зафиксировано достоверное снижение гемоглобина (от 143 г/л до 96 г/л), лейкоцитов (от $9,12 \times 10^9 \text{ л}^{-1}$ до $7,34 \times 10^9 \text{ л}^{-1}$) и эритроцитов (от $6,44 \times 10^{12} \text{ л}^{-1}$ до $4,87 \times 10^{12} \text{ л}^{-1}$) по сравнению с таковыми в контрольной группе.

Таким образом, в экспериментах на животных, установлено, что в условиях воздействия мощным КВ радиоизлучением (Опыт №1), происходит достоверное изменение динамики гематологических показателей периферической крови (см. Таблицу 1) с явно выраженным проявлением к 10 дню после окончания воздействия. В экспериментальной группе животных (Опыт №1) по сравнению с контролем обнаружены статистически значимые снижения уровня гемоглобина, до 44 % (с максимальным проявлением к 20 дню после воздействия).

Выраженные изменения исследуемых показателей периферической крови в Опыте №2 (режим 1) можно объяснить присутствием дополнительных сопутствующих химических (азон) и звуковых факторов, усиливающих эффект комбинированного воздействия техногенных электромагнитных излучений. Таким образом выявленные в экспериментах изменения периферической крови в основном свидетельствуют об угнетении системы кроветворения, с тенденцией к лейкопении, и анемии.

Выводы

1) Выявлено, что изменения гематологических показателей зависят от исходной реактивности организма и первичной стресс-реакции на действие исследуемого фактора.

2) Установлено, что в отдаленном периоде после воздействия мощными ЭМИ изменяется структура клетки, даже при нормальном уровне гемоглобина, в мазках периферической крови обнаруживаются качественные изменения эритроцитов, признаки которых отсутствовали у контрольных групп, поэтому своевременная и точная их диагностика может иметь важное клиническое значение.

Библиографический список

1. *Дрогичина Э.А.* К клинике хронического воздействия СВЧ на организм человека. В сб. «О биологическом действии сверхвысоких частот». Труды Института гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР.- М. 1960. С. 23-31.
2. *Моисеева О.И.* Физиологические механизмы регуляции эритропоэза. - Ленинград, Из-во «Наука», 1985. 145с.
3. *Ушаков И.Б.* Комбинированные воздействия в экологии человека и экстремальной медицине / И.Б. Ушаков.- М.: Издатцентр, 2003. 442 с.
4. *Храмоненко С. С., Ракитянская А. А.* Электрофорез клеток в норме и патологии. – Минск, Беларусь, 1974. 143 с.
5. *Шандала М.Г., Зуев В.Г., Ушаков И.Б., Попов В.И.* Справочник по электромагнитной безопасности работающих и населения. - Воронеж: Истоки, 1998. 82 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРЕСНОВОДНЫХ РАКООБРАЗНЫХ В РЯДУ ПОКОЛЕНИЙ

О.В. Воробьева

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова

E-mail: olvorobieva@rambler.ru

Несмотря на широкое применение низкоинтенсивного лазерного облучения, в том числе и в медицинской практике, появляется все больше данных о его побочных эффектах [1]. Так, было показано, что облучение гелий-неоновым лазером (ГНЛ) может спровоцировать появление аномальных особей в потомстве модельных тест-организмов, при этом негативный эффект может быть вызван паразитарными электромагнитными радиочастотными полями, генерируемыми самим прибором [2]. В связи с этим, целью работы являлось

изучение влияния ГНЛ на модельные тест-организмы в ряду поколений при минимизации влияния паразитарного облучения. В качестве объекта исследования были выбраны планктонные ракообразные *Daphniamagna* Straus, имеющие короткий жизненный цикл (половая зрелость наступает на 5-7 сутки, вымет молоди на 7-9, и далее каждые 2-3 дня). Дафнии являются чувствительным тест-объектом для определения токсичности растворов различных растворов, а также установления норм предельно допустимых концентраций [6]. Показана их чувствительность к действию электромагнитных полей различного диапазона (ЭМП) [2-5].

В качестве источника облучения использовали гелий-неоновый лазер ГНЛ-111 ($\lambda=632.8$ нм, мощность 20 мВт, время экспозиции 2-8000 с), на торце которого располагалась линза с фокусным расстоянием $F = 10$ мм. Интенсивность расфокусированного излучения лазера составляла 1 мВт/см². Поскольку светоизлучающие приборы, в частности ГНЛ-111, создают вокруг себя паразитарные ЭМП, которые могут оказать негативное влияние на облучаемые организмы [7], экспозицию проводили на расстоянии 2 м от лазерного источника, направив его луч в удаленное место облучения при помощи зеркал. Таким образом, действие паразитарных ЭМП прибора снижалось до фоновых значений полей в лаборатории.

Контролем служила выборка дафний того же возраста и из того же помета, что и опытная, но не подвергавшаяся облучению. Для выяснения отдаленных последствий действия облучения наблюдали за тремя последовательными поколениями (F_1 - F_3) облученных и контрольных особей. Для получения поколения F_1 из первого помета облученных и контрольных дафний произвольно отбирали по 20 особей, которых рассаживали в отдельные стаканы из расчета по пять особей на 250 мл воды в четырехкратной повторности. Для получения поколений F_2 и F_3 аналогичным образом отбиралось по 20 особей из первого помета поколения F_1 и F_2 , соответственно. Облучения поколений F_1 - F_3 не проводилось, все манипуляции по смене воды и кормлению проводились так же, как и в родительском поколении. Наблюдения за каждым поколением продолжались на протяжении 21 суток. Регулярно регистрировали выживаемость, плодовитость и качество потомства. Полученные результаты проверяли на статистическую значимость отличий экспериментальных данных от контрольных с помощью критерия Стьюдента (уровень значимости 0.05).

Облучение не оказало влияние на выживаемость дафний, а также на время наступления половой зрелости. Наименьшая из исследованных экспозиций 2 с не оказала статистически значимого влияния и на плодовитость рачков во всех исследуемых поколениях (рис. 1, табл. 1).

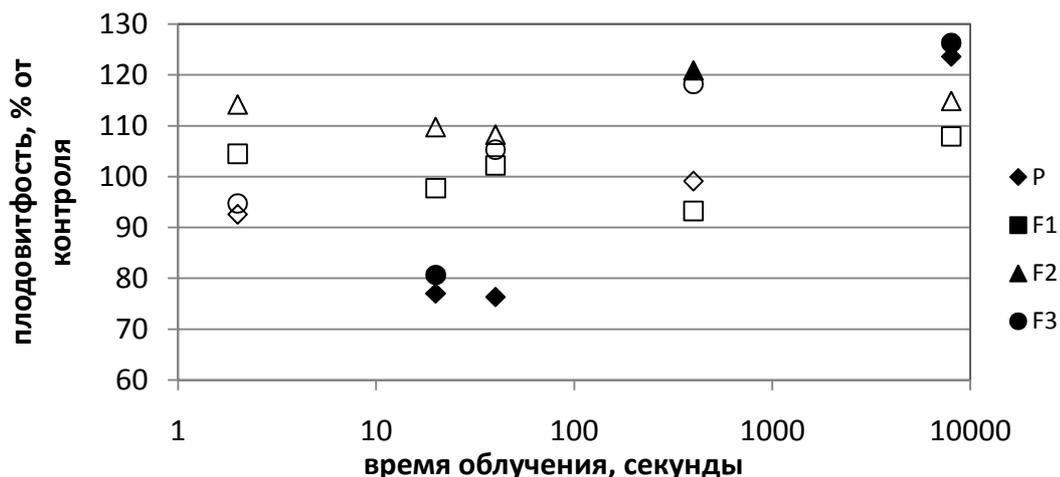


Рис. 1. Плодовитость *D. magna* в ряду поколений после однократного облучения ГНЛ (в % от контроля): черным цветом (●) отмечены статистически достоверные отличия от контроля

Таблица 1. Плодовитость *D. magna* в ряду поколений после однократного облучения ГНЛ

время облучения	P		F ₁		F ₂		F ₃	
	M±m	% от К.	M±m	% от К.	M±m	% от К.	M±m	% от К.
0 (контроль)	37,0±3,8		32,3±2,45		33,5±3,7		28,5±0,5	
2с	34,3±6,3	92,5	33,6±4,3	104,5	38,3±5,0	114,2	27,2±1,6	94,74
20с	28,5±2,6	77,0	31,5±5,7	97,7	36,8±4,9	109,7	23,0±2,1	80,7
40с	28,3±1,2	76,3	32,9±5,5	102,2	36,3±3,5	108,2	30,7±5,9	105,3
4000с	36,7±5,4	99,1	30,0±1,2	93,26	40,5±2,3	120,9	34,3±4,6	118,2
8000с	45,8±3,7	123,6	34,7±4,0	107,9	38,5±3,0	114,9	36,2±2,6	126,3

Жирным шрифтом выделены статистически значимые отличия от контроля (t критерий Стьюдента, уровень значимости 0,05)

Увеличение времени облучения сначала приводило к снижению (экспозиция 20 и 40 с), а затем к стимуляции плодовитости (экспозиция 4000 и 8000 с). При этом эффект от облучения заметнее всего наблюдался в родительском (облученном) и третьем (необлученном) поколениях. В первом дочернем поколении статистически значимых отличий от контроля не наблюдалось.

Таким образом, однократное облучение неполовозрелых особей низкоинтенсивным лазерным светом способно оказывать значимое действие на репродуктивные характеристики исследованного тест-объекта, которое может сохраняться до 3-го поколения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-34-01252

Библиографический список

1. Чудновский В.М., Леонова Г.Н., Скопинов С.А., Дроздов А.Л., Юсупов В.Н. Биологические модели и физические механизмы лазерной терапии. - Владивосток: Дальнаука, 2002. 157 с
2. Vorob'yeva O.V., Filenko O.F., Isakova E.F., Vorobieva N.N., Rybaltovskii A.O., Yusupov V.I. Bagratashvili V.N. Effect of He-Ne laser on *Daphnia magna* Straus manifested in subsequent generations // Laser Physics Letters, 2015. V. 12, №. 11. P. 115601–115607.
3. Воробьева О.В. Влияние прибора, генерирующего светодиодное облучение, на рачков *Daphnia magna* // Поволжский экологический журнал. 2013. № 4. С. 374-379.
4. Гапочка Л.Д., Гапочка М.Г., Дрожжина Т.С. Исакова Е.Ф., Павлова С.С., Шавырина О.Б. Эффекты облучения культуры *Daphnia magna* на разных стадиях развития электромагнитным полем миллиметрового диапазона низкой интенсивности // Вестник московского университета. Сер. 16. Биология. 2012. № 2. С. 43-48.
5. Воробьева О.В., Филенко О.Ф., Юсупов В.И., Баграташвили В.Н. Влияние лазерного облучения на *Daphnia magna* Straus // Материалы Всероссийской научной школы-семинара "Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами, под редакцией проф. Д.А. Усанова, Саратовский источник Саратов, 2015. 120–122 с.
6. Методические указания по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов (ПДК и ОБУВ) загрязняющих веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. / Под ред. О. Ф. Филенко, С. А. Соколовой.- М.: ВНИРО, 1998. 145 с.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА АКТИВНОСТЬ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА

Л.А. Кокорина, А.В. Неупокоева, Е.В. Симонова, А.Н. Малов
Иркутский государственный медицинский университет
E-mail: lubovkokorina1990@yandex.ru

Изучение влияния физических факторов на развитие микробных популяций может позволить повысить или понизить интенсивность микробиологических процессов, что дает возможность управлять развитием микробных популяций в интересах человека, например, использовать это при лечении инфекционных заболеваний человека.

В настоящий момент известно, что растворенные в жидкостях молекулы способны объединяться в кластеры (ассоциаты) за счет сил электростатического взаимодействия [1,2]. Молекула, включенная в такой кластер, теряет во взаимодействии: уменьшается ее подвижность, активные центры могут перекрываться рядом расположенными молекулами. Чем больше размер такого ассоциата, тем меньше отношение его массы к поверхности, следовательно, усвоение молекулы или протекание реакции происходят хуже. Поэтому разрушение кластеров

молекул на составляющие позволило бы повысить их биохимическую активность, а значит, и активность раствора в целом.

С другой стороны, экспериментально доказано [3,4], что под действием лазерного излучения кластеры способны распадаться на более мелкие образования, т.к. когерентное монохроматическое лазерное излучение вызывает интенсивные колебания заряженных участков макромолекул, в результате чего молекулы вырываются из кластеров, создавая, таким образом, гомогенную смесь с меньшим числом неоднородностей. В частности, большой интерес представляют результаты применения внутрисосудистого лазерного облучения крови (ВЛОК) в анестезиологии [5]: лазерное излучение позволило уменьшить количество анестетиков и снизить постхирургический стресс при оперативном вмешательстве.

В связи с этим, изучение влияния лазерного излучения на активность лекарственных препаратов является проблемой актуальной и практически значимой.

Целью настоящей работы было изучение влияния лазерного излучения на активность противогрибкового препарата нистатина.

В качестве тест-культуры была использована дрожжевая культура, развивающаяся на питательной среде с нистатином, подвергающейся воздействию низкоинтенсивным лазерным излучением в течение 60 секунд, мощностью – 100 мВт с длиной волны 532 нм, суммарная энергия облучения составляла около 5 Дж/г. Контролем служила питательная среда с нистатином, не подвергавшаяся воздействию лазерного излучения.

На рис. 1 приведена кривая роста дрожжей при воздействии нистатина в контрольном варианте и на среде с нистатином после лазерного облучения.

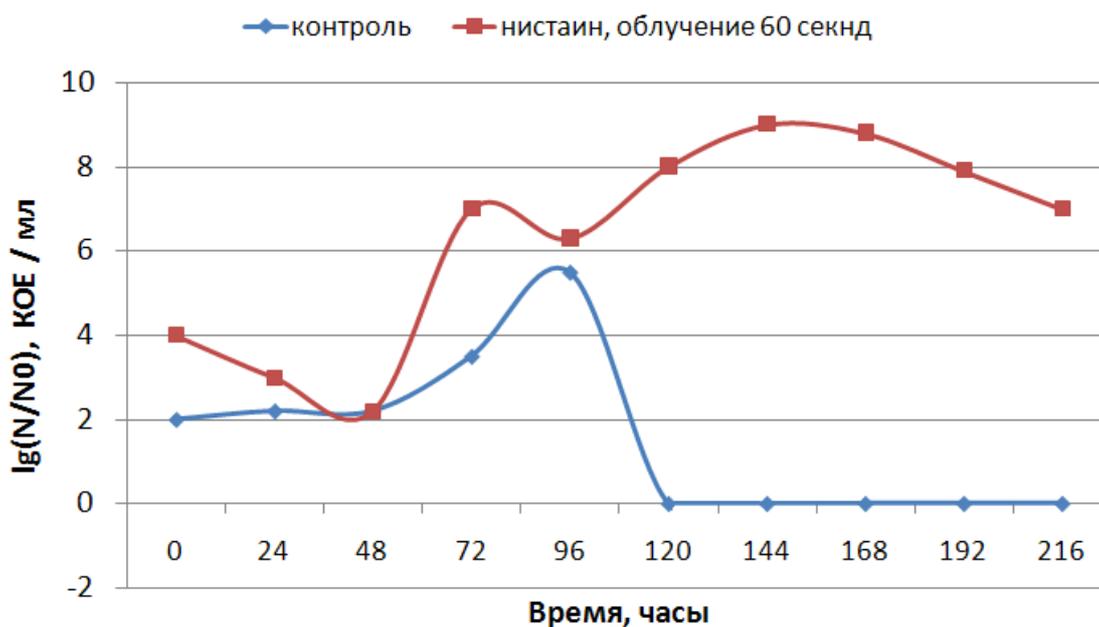


Рис. 1. Кривая роста дрожжей при воздействии нистатина в контрольном варианте и на среде с нистатином после лазерного облучения в течение 60 секунд

Характер роста культуры в контрольном варианте включает несколько экспоненциальных стадий (диауксический). Дрожжи достигают максимального развития к 144 часу, количество клеток при этом составляет 10^9 КОЕ/мл (или десятичный логарифм отношения числа колоний к начальному числу $\lg(N/N_0)=9$). Затем следует типичная стадия стационарного роста (горизонтальная часть кривой).

В опыте с облучением питательной среды с нистатином кривая роста не типичная (рис. 1) с однократной экспоненциальной стадией, стадия стационарного роста не прослеживается. Максимальное развитие дрожжевой культуры наблюдается на 96 часе опыта, $\lg(N/N_0)=5,5$ КОЕ/мл, что на несколько порядков ниже контрольного варианта. После чего рост культуры полностью ингибируется.

Наиболее чувствительно к действию факторов внешней среды клеточное деление. В качестве параметров, характеризующих скорость роста, использовали удельную скорость роста – отношения числа клеток, образовавшихся за единицу времени к общему числу клеток и число клеточных делений. В период развития тест-культуры в контроле число клеточных делений в стадию экспоненциального роста соответствовало 15,4, то в опыте этот показатель был в 1,4 раза ниже. Аналогичную зависимость наблюдали и по показателю удельной скорости роста тест-культуры. Кроме того, прослежено и то, что в опыте с использованием лазерного облучения время генерации превышает контрольное значение в 3 раза.

Подобные же результаты были получены при временах облучения 80 и 150 секунд. Однако увеличение времени лазерного воздействия до 300 секунд приводило к снижению степени активации лекарственного препарата и к приближению динамики роста к контрольным значениям.



Рис. 2. Число клеточных делений в фазе экспоненциального роста в контрольной культуре и в культуре, растущей на облученной среде

Таким образом, экспериментально показано, что лазерное излучение увеличивает антимикробную активность препарата, причем влияет не только на

абсолютные значения скорости роста, но и на динамику в целом. Выявлено также, что пороговой энергией лазерного воздействия в случае дрожжевая культура, развивающаяся на питательной среде с нистатином, можно считать энергию около 5 Дж/г. Увеличение энергии свыше 25 Дж/г приводит к нивелированию лазерного воздействия по сравнению с контрольным образцом.

Библиографический список

1. *Финкельштейн А.В., Птицын О.Б. Физика белка.* – М.: Книжный дом «Университет», 2002. 376 с.
2. *Лакно В.Д. Кластеры в физике, химии, биологии.* – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 256 с.
3. *Malov A.N., Musatova E.S., Setejkin A.U., Zinoviev S. V. Laser nanoclusterization processes simulation* // In «Modern Problems of Nanopharmacology», The 8th Russia and China Pharmaceutical Forum, Blagoveshchensk, 2011. p. 66 – 67.
4. *Malov A.N., Seteikin A.Yu., Neupokoeva A.V., Musatova E.S., Golub I.E., Sorokina L.V., Fet-schenko V.S., Vaichas A.A. The laser radiation action on the biological objects* // *Optik.* 2013. V.124, № 23. P. 6034- 6041.
5. *Малов А.Н., Голуб И.Е., Неупокоева А.В., Сорокина Л.В. Анестезия при внутривенном лазерном облучении крови* // Научная сессия НИЯУ МИФИ -2011. Научно-техническая конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. – М.: МИФИ, 2011. с. 94- 95.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ ЛИПОПРОТЕИНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

О.Е. Глухова, Г.В. Савостьянов

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: savostyanov.gv@gmail.com

Взаимодействие биомакромолекул с углеродными наноструктурами вызывает большой интерес в силу больших перспектив применения углеродных наноструктур в биотехнологиях, адресной доставки лекарств, доставки различных элементов через клеточную мембрану и др. Исследование поведения липопротеина высокой плотности (ЛВП) под воздействием неоднородной механической нагрузки может помочь в понимании процесса проникновения липопротеинов сквозь узкие каналы, например, через межэндотелиальные щели клеток внутри сосудов. Эта проблема очень важна, поскольку липопротеины, которые переносят холестерол (липопротеины низкой и очень низкой плотности), способны проникать в интиму артерий, в результате чего происходит накопление холестерола и развитие атеросклероза.

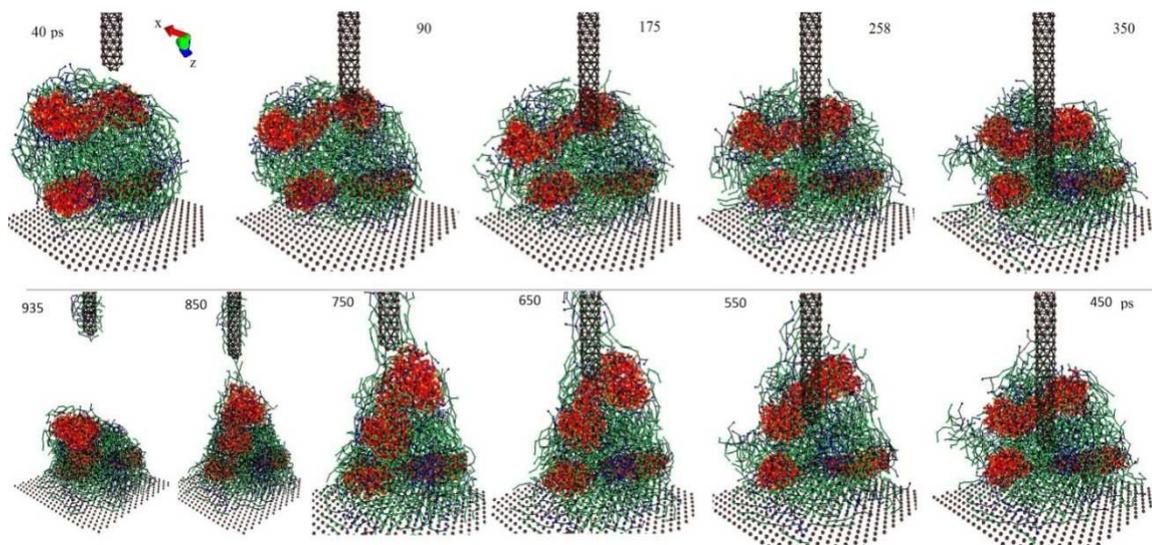


Рис. 1. ЛВП в процессе моделирования наноиндентирования

Моделирование индентирования ЛВП было осуществлено в рамках метода молекулярной динамики с применением крупнозернистого силового поля MARTINI. ЛВП помещался между неподвижной графеновой подложкой и закрытой одностенной углеродной нанотрубкой (УНТ). Все объекты находились в водном окружении при температуре 310 К. Моделирование проводилось в два этапа: на первом этапе УНТ приближалась к липопротеину, деформируя его, на втором этапе УНТ извлекалась из липопротеина. Было проведено два численных эксперимента по этой схеме, в которых скорость движения УНТ составляла соответственно 20 м/с и 5 м/с.

Оба численных эксперимента, соответствующие скоростям УНТ 20 м/с и 5 м/с, показали качественно идентичную картину. В ходе индентирования липопротеиновые пояса перестраивались в структуре ЛВП таким образом, что УНТ проходила не сквозь них, а сквозь фосфолипидную среду. В процессе моделирования обратного хода УНТ было обнаружено, что часть фосфолипидов переходит на УНТ. В остальном, после удаления УНТ липопротеин восстанавливает свою структуру. Таким образом, ЛВП обладает эластичностью и высокой способностью к перестраиванию структуры без потери целостности, что может обеспечивать им хорошую диффузионную способность в процессах проникновения сквозь межэндотелиальные щели.

Библиографический список

1. Ren J., Shen S., Wang D., Xi Z., Guo L., Pang Z., Qian Y., Sun X., Jiang X. The Targeted Delivery of Anticancer Drugs to Brain Glioma by Pegylated Oxidized Multi-Walled Carbon Nanotubes Modified with Angiopep-2 // *Biomaterials*. 2012. V. 33. P. 3324–3333.
2. Wallace E.J., Sansom M.S.P. Carbon Nanotube/Detergent Interactions via Coarse-Grained Molecular Dynamics // *Nano Lett.* 2007. V. 7. P. 1923–1928.

3. *Lelimosin M., Sansom M.S.* Membrane Perturbation by Carbon Nanotube Insertion: Pathways to Internalization // *Small*.2013. V. 9. P. 3639–3646.
4. *Wallace E.J., Sansom M.S.* Blocking of Carbon Nanotube Based Nanoinjectors by Lipids // *Nano Lett.* 2008. V. 8. P. 2751-2756.
5. *Klein M.L., Shinoda W.* Large-Scale Molecular Dynamics Simulations of Self-Assembling Systems // *Science*. 2008. V. 321. P. 798–800.
6. *Shi X.H., Kong Y., Gao H.J.* Coarse Grained Molecular Dynamics and Theoretical Studies of Carbon Nanotubes Entering Cell Membrane // *Acta Mech. Sin.* 2008. V. 24. P. 161–169.
7. *Gu F., Jones M.K., Chen J., Patterson J.C., Catte A., Jerome W.G., Li L., Segrest J.P.* Structures of Discoidal High Density Lipoproteins: A Combined Computational-Experimental Approach // *J. Biol. Chem.*2010. V. 285. P. 4652-4665.
8. *Catte A., Patterson J.C., Bashtovyy D., Jones M.K., Gu F., Li L., Rampioni A., Sengupta D., Vuorela T., Niemelä P. et al.* Structure of Spheroidal HDL Particles Revealed by Combined Atomistic and Coarse-Grained Simulations. // *Biophys. J.* 2008. V. 94. P. 2306-2319.
9. *Shih A.Y., Arkhipov A., Freddolino P.L.; Schulten K.* Coarse Grained Protein–Lipid Model with Application to Lipoprotein Particles // *J. Phys. Chem.B.* 2006. V. 110. P. 3674–3684.

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Е.В. Горлова, А.А. Дорошенко, А.Э. Постельга, Д.А. Усанов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: lehador1@yandex.ru

Оценка статистических параметров дыхательных движений играет важную роль при постановке диагноза заболеваний органов дыхания, а также для мониторинга эффективности процесса лечения.

В настоящее время для их определения используются контактные методы с использованием спирографа, эластичного пояса с датчиком натяжения [1]. Ввиду того, что эти методы могут вызывать дискомфорт пациента, возможно получение недостоверных выходных данных.

В данной работе предлагается методика бесконтактного определения параметров ритма дыхательных движений по форме движения грудной клетки, полученной с помощью СВЧ-автодина на диоде Ганна 1 (Рис.1). Подобная методика была реализована для расчёта параметров сердцебиения по форме движения грудной клетки и плечевой артерии [2-5].

В соответствии с предлагаемой методикой излучение электромагнитного сигнала с помощью СВЧ-генератора 2 через рупорную антенну 3, направляется

на грудную клетку человека 4. Отраженное излучение принимают через ту же рупорную антенну и когерентно складывают с излученным электромагнитным сигналом. Суммарный сигнал выбирают в качестве информативного сигнала. Результат сложения – информативный сигнал – выделяется с помощью детектора 5 и подаётся на аналого-цифровое устройство 6 для последующей его цифровой обработки на компьютере 7.

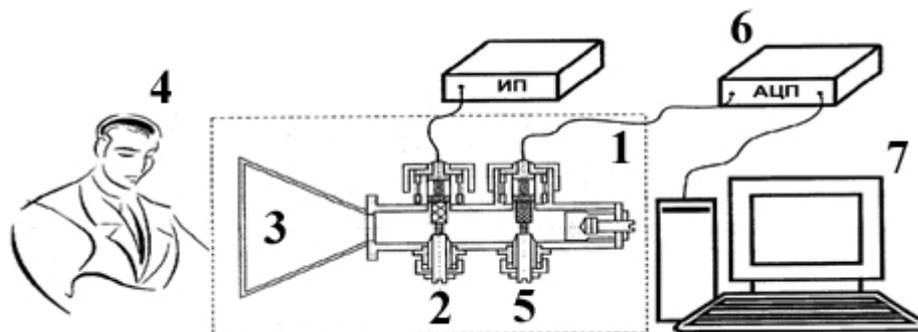


Рис. 1. СВЧ-автодин на диоде Ганна

Полученный сигнал (Рис.2) очищался от шумов, и далее в соответствии с методом, изложенном в [3], восстанавливалась форма движения грудной клетки (Рис.3).

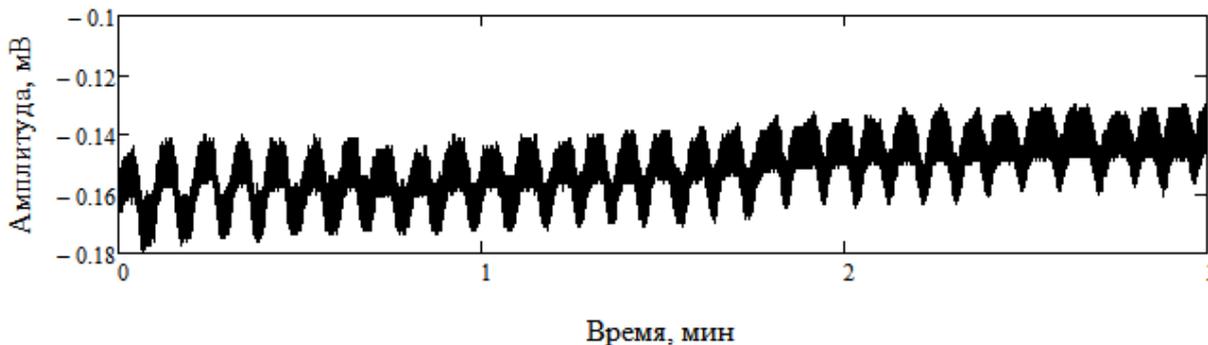


Рис. 2. Полученный сигнал

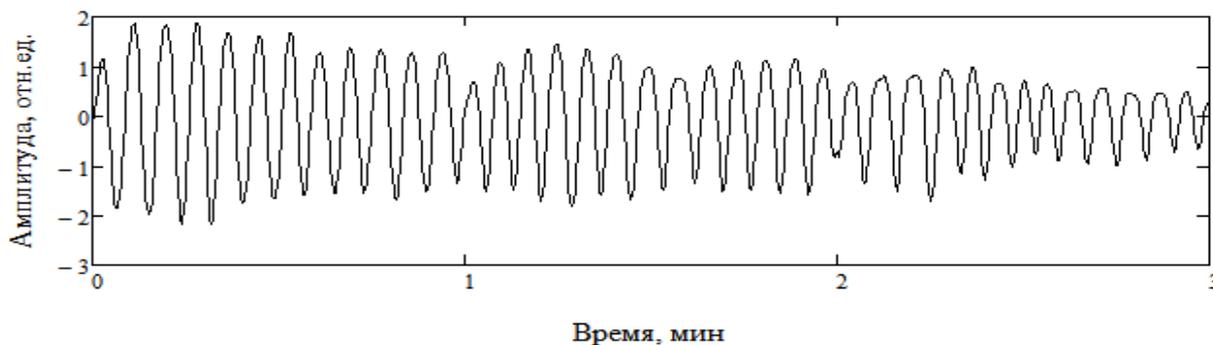


Рис.3. Восстановленная форма движения грудной клетки

По форме движения грудной клетки определялись временные интервалы дыхательных циклов. На Рис.4 изображено распределение дыхательных интервалов.

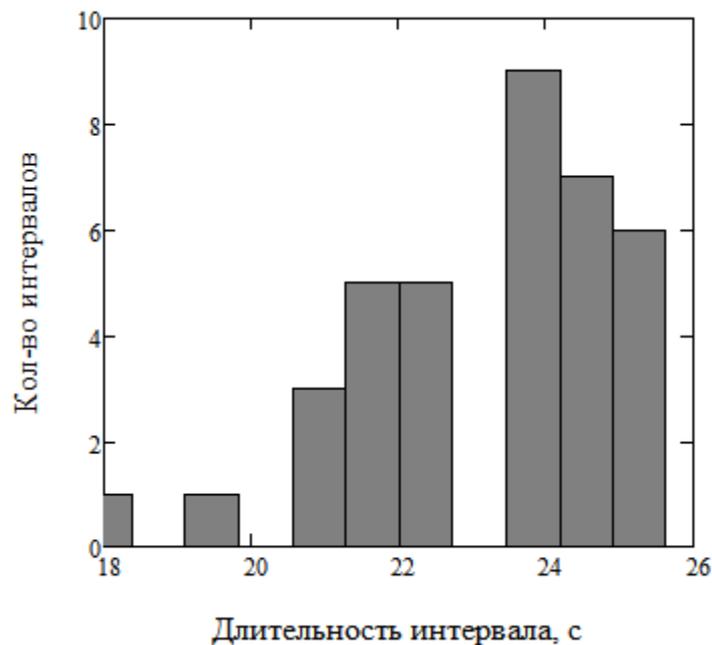


Рис.3. Гистограмма распределения дыхательных циклов

Рассчитывались параметры: среднеквадратическое отклонение, дисперсия, наиболее часто встречаемое значение интервалов

Таким образом, была показана возможность определения статистических параметров дыхательных движений по форме движения грудной клетки с помощью СВЧ-интерферометрии, что открывает дополнительные возможности для диагностики таких заболеваний как: ХОБЛ, астма, а также позволяет вести контроль за динамикой лечения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).

Библиографический список

1. Кузнецов В.И., Тараканов С.А., Рыжак Н.И., Мешковский И.К., Никитенко А.Н., Рассадина А.А. Диагностика респираторных параметров организма в оценке функционального состояния // Вестник новых медицинских технологий. 2013. № 1. Т. XX. С. 79-80.
2. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Дорошенко А.А. Определение параметров сердечной деятельности по форме колебаний плечевой артерии с помощью радиоволнового автодина // Медицинская физика. 2013. №4(60). С. 72-76.
3. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Дорошенко А.А. Восстановление сложного движения участка тела человека по сигналу радиоволнового автодина с использованием вейвлет-преобразований // Журнал Медицинская физика. 2013. № 1 (57). С. 78–84.
4. Усанов Д.А., Постельга А. Э. Восстановление сложного движения участка тела человека по сигналу радиоволнового автодина. // Медицинская техника. 2011. №1. С. 8–10.
5. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., и др. Радиоволновая интерферометрия движений тела человека, связанных с дыханием и сердцебиением // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. №11–12. С. 44–51.

BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS SA94 ASSOCIATED APPLE PLANT BACTERIUM AS A SOURCE OF POTENTIAL ANTIBIOTICS AND OTHER SECONDARY METABOLITES

H.A. Mohamed¹, A.M. Peterson¹, W.E. Ebrahim²

¹ Saratov State University, Faculty of Biology

E-mail: Hassan_awad37@mail.ru, alexandra.peterson@yandex.ru

² Heinrich-Heine University, Institute of Pharmaceutical Biology and Biotechnology,
Dusseldorf, Germany,

E-mail: weaamnabil@hotmail.de

Natural antagonistic microorganisms have emerged as a promising alternative to chemical interactions for more rational and safe crop management, so several strains belonging to the genus *Bacillus* and particularly to the *B. subtilis* and *B. amyloliquefaciens* species were reported effective for the bio control of multiple plant diseases caused by soil-borne [1] or post-harvest pathogens [2, 3, 4]. It is well known that some *Bacillus* species may synthesize numerous antimicrobial or, more generally, bioactive compounds with well-established activity *in vitro* [5]. However, except for a very limited number of strains [6], many studies that relate the global potential for antibiotic production with the biocontrol activity of a particular *Bacillus* strain have been reported. But *B. amyloliquefaciens* strain SA94 displays high *in vitro* inhibitory activity toward growth of multiple fungal and plant pathogens [7].

In this study we isolated 54 strains of *B. amyloliquefaciens* found on 21 apple shoots, all of these strains are morphologically characterized by performing Gram staining and Molecular characterization performed by 16S rRNA with sequences 16S-27F: AGAGTTTGATCNTGGYTCAG and 16S-907R2: CCGTGAATTCHTTTRAGTTT of rRNA gene sequence analysis it has identical sequences (100% of similarity) and it was confirmed by MALDI-TOF as *B. amyloliquefaciens*(SA94). Cultivation and isolation of secondary metabolites was done after fresh bacterial colonies suspension transferring into Erlenmeyer flask (1L) was containing 100 g rice for solid cultures. The cultures were then incubated at room temperature without shaking for 21 days. Then complete extraction filtration was done followed by repeated extraction with EtOAc and MeOH. HPLC analysis of the bacterial crude extract was investigated.

The isolated strain *B. amyloliquefaciens*(SA94), was tested *in vitro* to detection antagonistic activity against many of pathogenic fungi, the results showed that *B. amyloliquefaciens* recorded high antagonistic activity (fig. 1).



Fig. 1. Inhibition of *Fusarium tricinctum* (left) and *Aspergillus tubingensis* (right) growth with *B. amyloliquefaciens* SA94

According to Sephadex fractions, the peaks of the HPLC- chromatogram were matched with the reference compound available in the database by UV-Visible spectrum. The peaks in the chromatogram having the same UV-Visible spectrum and retention time with that of the reference compound was identified and named. 1-Scalarolide, 2-Cerebroside, 3-Palitantin all of these data are listed in (fig. 2) and (Table 1).

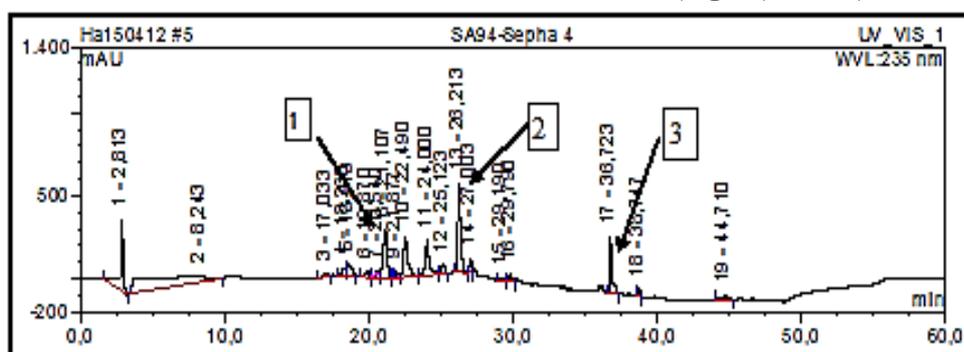


Fig. 2. HPLC chromatogram of *B. amyloliquefaciens* crude extract of (1) Scalarolide, (2) Cerebroside, (3) Palitantin

Table 1. Characteristics of isolated metabolites from dominant fungi

Species	Metabolites	Chemical formula	HPLC retention time	Characters
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Scalarolide	C ₂₅ H ₃₈ O ₃	21.1 min	antimicrobial
	Cerebroside	C ₄₁ H ₇₇ NO ₉	28.2 min	Antibiotic
	Palitantin	C ₁₄ H ₂₂ O ₄	36.7 min	Antiprotozoa & antimicrobial

The bacterial crude extract was tested for cytotoxicity against the mouse lymphoma cell line L5178Y. (IC₅₀>10 mg/mL), using the microculture tetrazolium (MTT) assay, as well as antibacterial potentials of the crude extract were evaluated against *Staphylococcus aureus* ATCC 25922, and *Mycobacterium tuberculosis*. The results showed that *B. amyloliquefaciens* crude extract has antibacterial activity against *S. aureus* ATCC 25922, but not active against *M. tuberculosis*. Also bacterial crude extract showed weak cytotoxic activity against lymphoma cell line L5178Y,

these experiments carried out by Prof. Dr. Kassack, M. Institute of Pharmaceutical and Medicinal Chemistry, Heinrich-Heine University, Düsseldorf, Germany.

References

1. Leclere V., Bechet M., Adam A., Guez J.S., Wathélet B., Ongena M., Thonart P., Gancel F., Chollet-Imbert M., Jacques P. Mycosubtilin overproduction by *Bacillus subtilis* BBG100 enhances the organisms antagonistic and biocontrol activities. Applied and environmental microbiology. 2005. V. 71. P. 4577-4584.
2. Senghor A., Liang W.L., Ho W. Integrated control of *Colletotrichum gloeosporioides* on mango fruit in Taiwan by the combination of *Bacillus subtilis* and fruit bagging. Biocontrol science and technology. 2007. V. 9. P. 575-580.
3. Yang Z., Guo H., Zhang X. Study on the control of peach post-harvest diseases using *Bacillus subtilis*. China Fruits. 2008. V. 23. P. 35-38.
4. Kotan R., Dikbas N., Bostan H. Biological control of post-harvest disease caused by *Aspergillus flavus* on stored lemon fruits. African journal of biotechnology. 2009. V. 8. P. 209-214.
5. Stein T. *Bacillus subtilis* antibiotics: structures, syntheses and specific functions. Molecular microbiology. 2005. V. 56.P. 845-857.
6. Chen X., Koumoutsi A., Scholz R., Schneider K., Vater J., Sussmuth R., Piel J., Borriss R. Genome analysis of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 reveals its potential for biocontrol of plant pathogens. Journal of biotechnology. 2009.V. 140. P. 27-37.
7. Toure Y., Ongena M., Jacques P., Guiro A., Thonart P. Role of lipopeptides produced by *Bacillus subtilis* GA1 in the reduction of grey mould disease caused by *Botrytis cinerea* on apple. Journal of applied microbiology. 2004. V. 96. P.1151-1160.

4. ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА

ОБРАТИМЫЕ ОТКАЗЫ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.М. Бобрешов, И.С. Коровченко, В.А. Степкин, Г.К. Усков, Лэ Куанг Тук
Воронежский государственный университет
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Качество работы любого современного приемника напрямую зависит от характеристик радиоприемного тракта, основными элементами которого обычно являются антенна и малошумящий усилитель (МШУ). В качестве объектов исследования были выбраны GaAs полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ), AlGaAs транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) и SiGe биполярные транзисторы с гетеропереходом (БТГП), как наиболее часто используемые приборы в составе МШУ СВЧ диапазона. Выбор указанных типов приборов обусловлен в первую очередь низким уровнем собственных шумов.

В связи с большой перспективой использования сверхширокополосных устройств в настоящее время влияние импульсных помех и методов защиты от них выходит на первый план. В работах [1–7] рассматривается воздействие преднамеренных и непреднамеренных импульсных помех на характеристики МШУ СВЧ диапазона на основе полевых транзисторов. Отмечается, что импульсное воздействие приводит к временному уменьшению (деградации) тока стока активного элемента, а следовательно и к уменьшению коэффициента усиления. При этом эффект обладает последствием, а время деградации не ограничивается временем воздействия.

В данной работе приведены обобщенные результаты экспериментальных исследований временной деградации выходного тока БТГП, ПТШ и ТВПЭ в составе однокаскадного МШУ при воздействии последовательности видеоимпульсов субнаносекундной длительности различной амплитуды.

В ходе исследований обратимых отказов МШУ при воздействии видеоимпульсов была выработана общая схема построения экспериментального исследования статических характеристик для всех типов полупроводниковых

приборов. Установка предусматривает возможность воздействия на входные и выходные цепи МШУ последовательностей видеоимпульсов различной полярности, амплитуды, длительности и частоты повторения. Контролируемой величиной является выходной ток транзистора, однозначно связанный с коэффициентом усиления. Дegrадация транзистора в результате импульсного воздействия оценивается по изменению этой величины относительно первоначального значения (рис. 1). В качестве измерительного модуля выбран однокаскадный МШУ, работающий в режиме максимального усиления сигнала. Для исследования воздействия на полевые транзисторы используется схема подключения транзистора с общим истоком, для биполярных – с общим эмиттером.

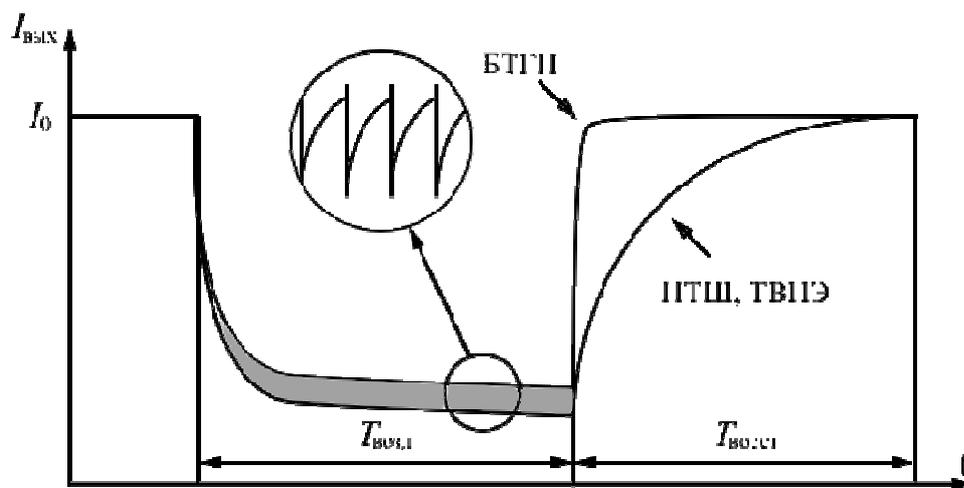


Рис. 1. Временная диаграмма выходного тока МШУ

Проведенные эксперименты с ПТШ и ТВПЭ [4-7] показали, что воздействие на входные цепи приводит к четко выраженным явлениям релаксации в межимпульсных промежутках, наступающим при импульсных напряжениях отрицательной полярности, величина которых превышает напряжение отсечки. Установлено, что причиной возникновения эффекта обратимой деградации в полевых транзисторах является образование избыточного объемного заряда в результате захвата носителей заряда на глубокие уровни в подложке, который в свою очередь сужает канал транзистора и приводит к уменьшению тока стока. При воздействии импульсов положительной полярности как в цепи стока, так и в цепи затвора также наблюдались катастрофические отказы, при которых усиливающие свойства транзистора терялись, возникали пробойи различных типов и пр.

Воздействие импульсной последовательности на входную цепь МШУ на основе БТГП также приводило к обратимым отказам (рис. 1). Величина максимального напряжения импульсов влияла на длительность восстановления тока до первоначального значения. Необходимо отметить, что, в отличие от воздействия на полевые транзисторы, обратимая деградация выходного тока наблюдалась как при импульсах отрицательной полярности, так и положительной. Обратимые отказы БТГП могут быть связаны с наличием глубоких уровней на

границах раздела база-коллектор, база-эмиттер. При действии достаточно большой величины поля, как положительной, так и отрицательной полярности носители приобретают энергию, достаточную для перехода на энергетический уровень вблизи запрещенной зоны полупроводника. В результате количество носителей в рекомбинационном токе уменьшается, что приводит к уменьшению тока коллектора. Во время релаксации уровней рекомбинационный ток снова нарастает до начальной величины. Время релаксации значительно меньше, чем в случае с полевыми транзисторами. Это связано с меньшим количеством глубоких уровней и непосредственным влиянием поля на их разрядку.

Поскольку ПТШ, ТВПЭ и БТПП входят в число наиболее уязвимых элементов радиоприемного тракта современной радиоаппаратуры СВЧ-диапазона в отношении внешних воздействий, полученные результаты могут быть использованы при решении практических задач обеспечения надежности функционирования радиоаппаратуры в условиях мощных электромагнитных помех. Разработанные экспериментальные методы и устройства могут быть использованы для тестирования и других типов полупроводниковых приборов на стойкость к обратимым отказам на этапах разработки и производства радиоаппаратуры.

Работа проведена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-42-360381 p_a).

Библиографический список

1. Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д.В. и др. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. №1. С. 37-53.
2. James D.S., Dormer L. A study of high power pulsed characteristics of flow-noise GaAs MESFET's // IEEE Trans. 1981, v. MTT-29. N. 12. P. 1298-1310.
3. Баранов И.А., Климова А.В., Манченко Л.В. и др. Влияние глубоких уровней в буферном слое на характеристики транзисторов и маломощных усилителей при воздействии импульсов СВЧ-мощности // Радиотехника. 2006. №3. С. 34-42.
4. Бобрешов А.М., Дыбой А.В., Китаев Ю.И. и др. Исследование обратимых отказов GaAs ПТШ при импульсных перегрузках // Известия вузов. Электроника. 2006. №5. С. 69-77.
5. Бобрешов А.М., Дыбой А.В., Китаев Ю.И., Нестеренко Ю.Н. Экспериментальное определение стойкости полевых транзисторов к импульсным перегрузкам // Приборы и техника эксперимента. 2007. №5. С. 108-113.
6. Бобрешов А.М., Левченко В.Н., Китаев Ю.И. и др. Экспериментальное исследование обратимой деградации GaAs ПТШ под действием сверхкоротких видеоимпульсов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. №1. С. 104-111.
7. Бобрешов А.М., Ряполов М.П., Усков Г.К. Обратимые отказы НЕМТ-транзисторов под действием сверхкоротких видеоимпульсов / А.М. Бобрешов, М.П. Ряполов, Г.К. Усков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12, № 1. С. 62-67.

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ НАНОМЕТРОВАЯ МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЛЕНКА – ДИЭЛЕКТРИК МЕТОДОМ ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, Е.В. Латышева
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского"
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Одним из важнейших этапов в процессе создания слоистых структур на основе нанометровых металлических пленок является обработка высокочувствительных СВЧ-методов контроля их параметров.

В настоящей работе рассмотрена возможность использования волноводно-диэлектрического резонанса [1–3] для реализации высокочувствительного СВЧ-метода измерения параметров нанометрового металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую подложку.

Исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с двухслойной структурой, состоящей из пластины поликора с нанесенным нанометровым металлическим слоем (толщиной t и электропроводностью σ), при ее размещении перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси (см. рис.1).

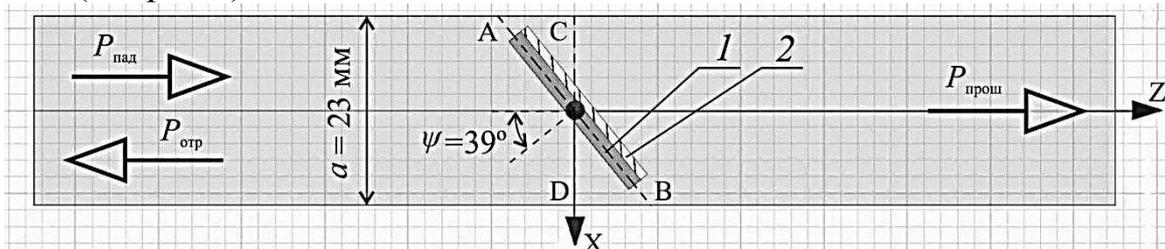


Рис. 1. Расположение исследуемой структуры в волноводе: 1 — Al_2O_3 , 2 — TaAlN . $P_{\text{пад}}$ –падающая мощность, $P_{\text{прош}}$ –прошедшая мощность, $P_{\text{отр}}$ –отраженная мощность.

При указанном размещении диэлектрической пластины на частотных зависимостях коэффициентов прохождения электромагнитной волны наблюдаются пики прохождения и ослабления. Характерные частоты этих пиков определяются геометрическими размерами и электрофизическими параметрами диэлектрической пластины и углом её поворота ψ относительно продольной оси волновода.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик исследуемой структуры при различных значениях толщины и удельной электропроводности нанометрового металлического слоя было проведено при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS (см. рис.2).

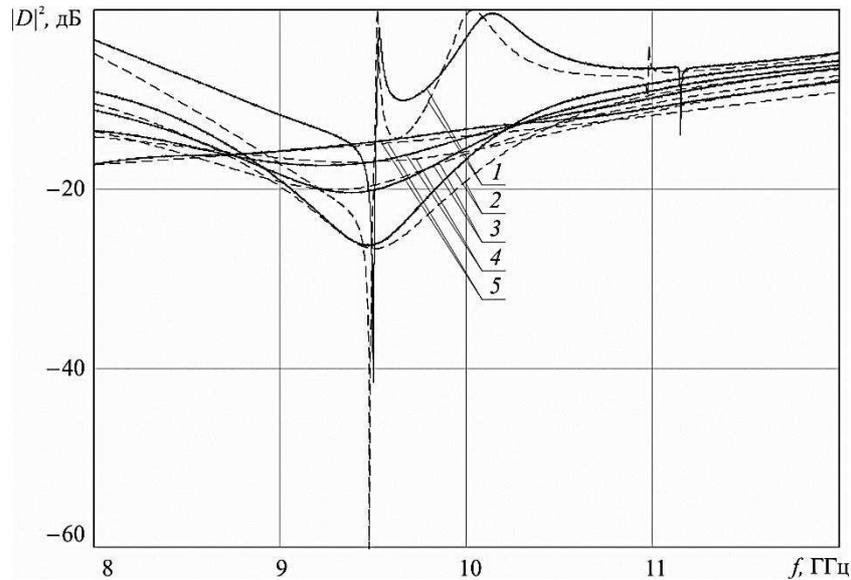


Рис. 2. Расчетные (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные линии) частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой: 1– пластина поликора без металлического слоя; 2 - $t = 13.5$ нм, $\sigma = 1.38 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; 3 - $t = 22.6$ нм, $\sigma = 1.4 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; 4 - $t = 30$ нм, $\sigma = 1.658 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; 5 - $t = 40$ нм, $\sigma = 2.638 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Результаты компьютерного моделирования демонстрируют наличие на частотной зависимости квадрата модуля коэффициента прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с пластиной поликора, двух пиков прохождения на частотах 9.52 ГГц и 10.03 ГГц и двух пиков ослабления на частотах 9.48 ГГц и 9.62 ГГц. Величины пиков ослабления составляют -60.1 дБ и -14.3 дБ, соответственно.

На рис. 3 представлены результаты расчета распределения напряженности поля на частоте, соответствующей пику прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с пластиной поликора (вдоль широкой стороны поликоровой пластины, вдоль линии АВ).

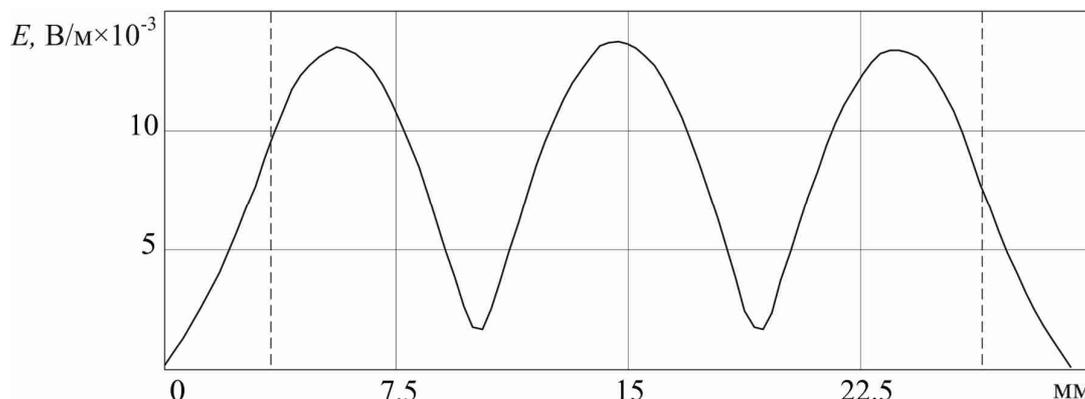


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля E электромагнитной волны на частоте 10.03 ГГц, при расположении пластины поликора перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода вдоль анализируемой линии АВ.

Штриховыми линиями на рис. 3 обозначены границы области, занимаемой исследуемой структурой вдоль анализируемой линии АВ.

Как следует из результатов расчета на частоте, соответствующей пику прохождения, возникает распределение поля, соответствующее стоячей волне с тремя пучностями и четырьмя узлами. Поскольку в поперечном сечении волновод оказывается частично заполненным по широкой стенке, то распределение поля в поперечном сечении волновода вдоль линии CD существенно отличается от распределения, характерного для волны основного типа H_{10} . Распределение поля в продольном сечении волновода, проходящем посередине широкой стенки волновода, характеризуется резким нарастанием напряженности в центральном сечении образца и её спадом на его границах. Из результатов расчета также следует, что на частоте, соответствующей пику пропускания, вне образца реализуется режим бегущей волны.

Как следует из результатов компьютерного моделирования, нанесение даже сверхтонкой металлической пленки ($t = 1.0$ нм, $\sigma = 8.0 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) приводит к исчезновению пика прохождения на частоте 9.52 ГГц. При нанесении металлической пленки толщиной более $t = 2.0$ нм и электропроводностью более $\sigma = 2.4 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ исчезает пик прохождения и на частоте 10.03 ГГц.

При нанесении тонкой металлической пленки ($t = 1.0$ нм, $\sigma = 8.0 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) величина пика ослабления на частоте 9.48 ГГц уменьшается до -23.3 дБ, при этом пик ослабления на частоте 9.62 ГГц трансформируется в область перегиба. В этом диапазоне толщин расчетная чувствительность $d(|D|^2)/dt$ достигает 36.8 дБ/нм.

Как следует из результатов расчета на частоте $f = 9.63$ ГГц в диапазоне толщин $0 \div 7$ нм расчетная чувствительность $d(|D|^2)/dt$ квадрата модуля коэффициента прохождения к изменению толщины металлического слоя составляет 4.6 дБ/нм.

Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов прохождения $|D|^2(f)$ электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, характеристики которой соответствовали используемым при численном моделировании представлены на рис. 2 в виде сплошных линий.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными свидетельствует об их хорошем количественном совпадении.

Полученные расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования волноводно-диэлектрического резонанса для контроля параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, при размещении исследуемой структуры перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси. При этом теоретически обоснованная чувствительность коэффициента прохождения к вариации толщины в предложенном методе пре-

вышает более чем на порядок чувствительность СВЧ-метода измерения нанометровых металлических слоев, основанного на использовании СВЧ фотонных кристаллов с нарушением периодичности, в качестве которого выступает измеряемая структура [4, 5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).

Библиографический список

1. *Усанов Д.А., Горбатов С.С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ.* - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2011. 392 с.
2. *Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Рудь Л.А. Резонансное рассеяние волн. Т.2 - Волноводные неоднородности.* – Киев: Наукова Думка, 1986. 216 с.
3. *Занин В. И., Усанов Д. А., Феклистов В. Б. Определение электрофизических параметров полупроводника волноводным резонансным методом// Межвузовский сборник научных статей "Электродинамика слоисто-неоднородных структур СВЧ".* - Самара: Изд-во Самар. ун-та, 1995. С. 88–99.
4. *Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В.* Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов// Доклады Академии Наук. 2013. Т. 448, № 1. С. 35-37.
5. *Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Латышева Е. В.* Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов// Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 45–53.

ПОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

А. М. Бобрешов, С. Е. Нескородов, Г. К. Усков
Воронежский государственный университет
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

1. Введение.

В последние годы возрастает интерес к импульсным системам, используемым, как в радиолокации, так и в связи. Потенциально высокие информационные возможности с повышенными характеристиками энергоскрытности сверхширокополосных (СШП) сигналов по сравнению с узкополосными подогревают интерес к подобным системам [1]. В связи с этим актуальными являются задачи по исследованию работы антенн в импульсном режиме [2], среди которых, на сегодняшний момент, наиболее распространенным является метод

электродинамического моделирования, основанный на решении полной задачи электродинамики излучения антенных систем [3]. Такой подход является наиболее точным, однако не лишен недостатков – помимо большой сложности, до сих пор описаны лишь излучатели простой формы [2]. В данной работе предложен простой метод построения импульсных энергетических диаграмм направленности (ЭДН) антенн по узкополосным, не требующий больших вычислительных мощностей.

2. Методика расчета.

В работе [4] предложен метод формирования СШП импульсного сигнала на основе суммирования отдельных гармоник с подстройкой фазы каждой составляющей. В силу линейности приема-передающих трактов можно считать что, импульсный сигнал на приемной антенне является суммой множества отдельных узкополосных компонент, что следует из разложения сигнала в ряд Фурье, излучение каждой компоненты которого описывается в свободном пространстве формулой Фрииса [5]. Имея данные по семейству узкополосных диаграмм направленности, возможно проводить оценку импульсной ЭДН, не имея данных о размерах и структуре антенны. Пусть известно семейство коэффициентов усиления излучающей $F(\omega, \varphi, \gamma)$ и приемной $G(\omega)$ антенн, r – расстояние между антеннами. Тогда энергию на приемной антенне можно записать как:

$$E(\varphi, \gamma) = \sum_i \frac{F(\omega_i, \varphi, \gamma) G(\omega_i) c^2}{4\omega_i^2 r^2} e^{2j\omega_i \tau} E_i(\omega_i),$$

где $E_i(\omega_i)$ - спектр мощности импульса, τ – фазовый сдвиг при распространении в среде и в антеннах. Будем считать, что КПД антенны близок к 1, а $G(\omega) = G$ – частотно независим. Тогда ЭДН можно найти из общих формул, приведенных в работе [6]. В случае наличия только одной гармоники, выражения принимают вид стандартных для монохроматических сигналов.

3. Экспериментальная проверка.

Для подтверждения написанного выше в работе был поставлен эксперимент по излучению и приему сверхширокополосного импульсного сигнала антеннами с известными параметрами – ДН с дискретизацией 40 МГц в рабочем диапазоне. В качестве излучаемого сигнала использовался моноцикл длительностью 2.5 нс и амплитудой 45 В. Измерение импульсной ЭДН было проведено по методу вышки, описанному в [7].

Сравним измеренную ЭДН с рассчитанной по методу, описанному выше. На рис. 1 сплошной линией показаны результаты моделирования, точками – экспериментальные данные. В направлении максимального излучения разница ЭДН между рассчитанным с помощью узкополосных ДН и экспериментальными значениями составила 0.1 дБ; разница в ширине главного лепестка составила 2° ; в главном лепестке значения энергетического коэффициента направленного действия в направлении отличаются от расчетных не более чем на 0.5 дБ.

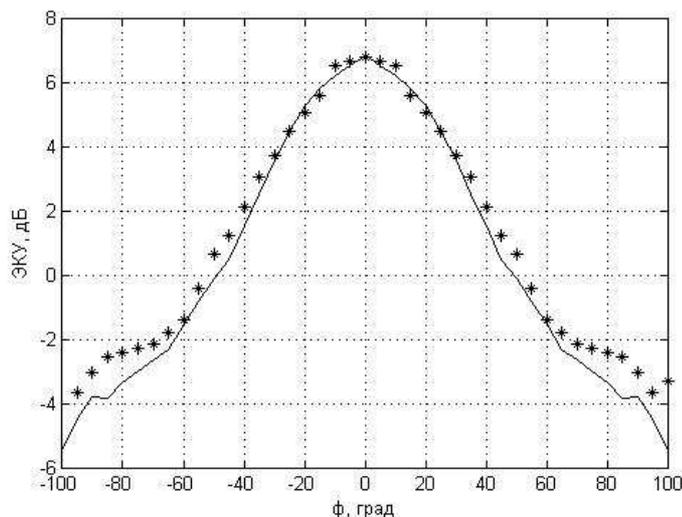


Рис. 1. Экспериментальная и расчетные ИЭДН.

4. Заключение.

Рассмотренный метод построения ЭДН не может заменить решение полной задачи электродинамики, так как не дает представлений о структуре поля, а также не может применяться, если хотя бы одна из антенн находится в ближней зоне другой. Однако на ранних этапах проектирования импульсных радиосистем, когда конструкция приемопередающих модулей еще не определена, данный метод может использоваться для оценки импульсных излучающих характеристик системы по паспортным узкополосным диаграммам направленности антенных систем.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых - докторов наук (проект МД-7902.2016.9).

Библиографический список

1. Белкин В.С., Шульженко Г.И. *Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе.* – Новосибирск: Институт ядерной физики, 1991. 36 с.
2. Бахрах Л.Д. Перспективы разработок антенн, излучающих сверхкороткие импульсы / Л. Д. Бахрах, О. С. Литвинов, Н. Я. Морозов // *Антенны.* 2006. Т. 110, №7. С. 85-91.
3. Иммореев И.Я. Излучение сверхширокополосных сигналов / И. Я. Иммореев, А. Н. Синявин // *Антенны.* 2001. Т. 47, №1. С. 8-16.
4. Финкельштейн М. И. *Радиолокация слоистых земных покровов* / М. И. Финкельштейн, В.Л. Мендельсон, В. А. Кутев; Под ред. М. И. Финкельштейна. – М.: Советское радио, 1977. 176 с.
5. Черный Ф.Б. *Распространение радиоволн.* 2-е изд., испр. и доп. – М.: Советское радио, 1972. 464 с.
6. Надененко С.И. *Антенны.* – М.: Радио и связь, 1959. 554 с.
7. Цейтлин Н.М. *Методы измерения характеристик антенн СВЧ* / Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, В. И. Турчин и др.; Под ред. Н. М. Цейтлина. // М.: Радио и связь, 1985. 368 с.

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА АВТОДИННОГО ДАТЧИКА ДЛЯ СЛУЧАЯ ОДНОВРЕМЕННО ВИБРИРУЮЩЕГО И ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ ТОЧЕЧНОГО ОБЪЕКТА

К.А. Игнатков

УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

E-mail: k.a.ignatkov@gmail.com

Для определения параметров перемещений объектов в различных областях науки и техники широкое применение находят автодинные СВЧ-датчики [1 – 2]. Автодины являются простейшими приёмопередающими устройствами, представляющими собой совокупность автогенератора и средств выделения автодинного низкочастотного информационного отклика. Именно это делает привлекательным их применение в качестве первичных преобразователей перемещений элементов различных агрегатов и механизмов.

В общем случае движение составных частей различных механизмов может быть представлено как совокупность прямолинейного движения, что справедливо для некоторого малого промежутка, и соосного с направлением прямолинейного движения вибрационного перемещения малой по сравнению с длиной волны СВЧ излучения амплитуды. В первом приближении упрощенная модель описанного выше процесса может быть представлена соответствующим перещением точечного отражающего объекта.

В известных автору работах анализ процесса формирования автодинного отклика при решении данной задачи рассмотрен с позиций «частотного» подхода, используя понятие частоты Доплера. При этом учёт одновременно поступательного движения объектов локации в данной модели представляется сложным и не всегда корректным.

Целью данной работы является рассмотрение «фазового» подхода, позволяющего одновременно учесть не только обе составляющие перемещений, но и особенности формирования сигналов, связанные с внутренними свойствами автодинов.

Учитывая принятые выше упрощения, выражение для удвоенного текущего расстояния до отражающей точки на поверхности объекта локации следует записать как сумму, в которой первое слагаемое учитывает поступательное движение объекта, второе – вибрационное, представленное гармонической функцией:

$$l(t) = \nu t + Z_m \sin(\Omega_v t), \quad (1)$$

где ν – скорость поступательного движения объекта локации; Z_m , Ω_v – амплитуда и частота вибраций.

Далее выполним нормировку членов выражения (1) относительно половины длины волны СВЧ излучения $\lambda/2$, что дает возможность выполнить анализ в единицах безразмерного времени $t_n = \omega_0 t$ и без привязки к конкретному значе-

нию частоты излучения:

$$l_{\text{H}}(t_{\text{H}}) = \nu_{\text{H}} / (\lambda / 2) + [Z_m / (\lambda / 2)] \sin(\Omega_{\text{B}} t_{\text{H}}) \quad (2)$$

Далее с учётом (2) и известных соотношений [3] для расчёта автодинов получим выражение для фазовой характеристики $\delta(t_{\text{H}})$ (ФХА) автодина:

$$\delta(t_{\text{H}}) = 2\pi l_{\text{H}}(t_{\text{H}}) - C_{\text{oc}} \sin[\delta(t_{\text{H}}) + \theta], \quad (3)$$

которая записана как зависимость набега фазы δ от величины нормированного времени t_{H} . Учитывая зависимость значения набега фазы от текущего нормированного времени t_{H} , мы получаем возможность построить соответствующий график зависимости набега фазы (см. кривая 1 на рис. 1).

На основании результатов работы [3], с использованием зависимости набега фазы (3) от времени, представлены выражения для частотной $\chi_{\text{H}}(t_{\text{H}})$ (ЧХА) и амплитудной $a_{\text{H}}(t_{\text{H}})$ (АХА) нормированных характеристик автодина и характеристики автодетектирования $i_{\text{H}}(t_{\text{H}})$ (ХАД), нормированных по их амплитудным значениям χ_m , a_{1m} , a_{0m} , соответственно:

$$\chi_{\text{H}}(t_{\text{H}}) = \chi(t_{\text{H}}) / \chi_m = -\sin[\delta(t_{\text{H}}) + \theta], \quad (4)$$

$$a_{\text{H}}(t_{\text{H}}) = a_1(t_{\text{H}}) / a_{1m} = \cos[\delta(t_{\text{H}}) - \psi_1], \quad (5)$$

$$i_{\text{H}}(t_{\text{H}}) = i(t_{\text{H}}) / a_{0m} = \cos[\delta(t_{\text{H}}) - \psi_0]. \quad (6)$$

Графики нормированных ЧХА и АХА представлены на рис. 1, кривые 2 и 3 соответственно. Для проведения расчетов величина параметра внешней обратной связи C_{oc} принята равной 0,628 [4, с. 38].

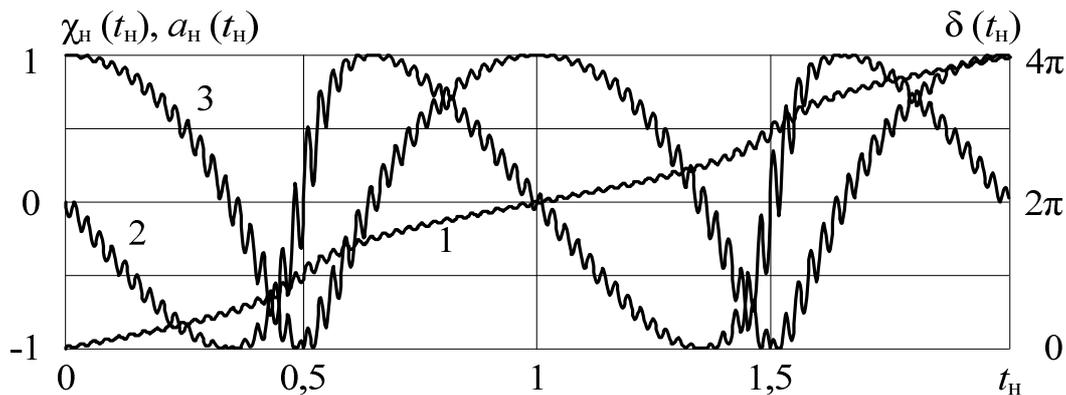


Рис.1. ФХА $\delta(t_{\text{H}})$, ЧХА $\chi_{\text{H}}(t_{\text{H}})$, АХА $a_{\text{H}}(t_{\text{H}})$

Далее рассмотрим особенности составляющей автодинного отклика, вызванные вибрацией движущегося точечного объекта. Для этого из полученных выше выражений для автодинных характеристик (4) – (6) вычтем выражения, описывающие составляющие характеристик, формируемые при поступательном прямолинейном перемещении точечного объекта:

$$\chi_{\text{H_вибр}}(t_{\text{H}}) = \chi_{\text{H}}(t_{\text{H}}) - \chi_{\text{H_прям}}(t_{\text{H}}) = -\sin[\delta(t_{\text{H}}) + \theta] + \sin[\delta_{\text{прям}}(t_{\text{H}}) + \theta], \quad (7)$$

$$a_{н_вибр}(t_н) = a_н(t_н) - a_{н_прям}(t_н) = \cos[\delta(t_н) - \psi_1] - \cos[\delta_{прям}(t_н) - \psi_1], \quad (8)$$

$$i_{н_вибр}(t_н) = i_н(t_н) - i_{н_прям}(t_н) = \cos[\delta(t_н) - \psi_0] - \cos[\delta_{прям}(t_н) - \psi_0]. \quad (9)$$

На рис. 2 представлены графики характеристик (7) и (8), отображающие вклад вибрационной составляющей в ЧХА и АХА в различные моменты времени и, соответственно, на различном удалении от генератора.

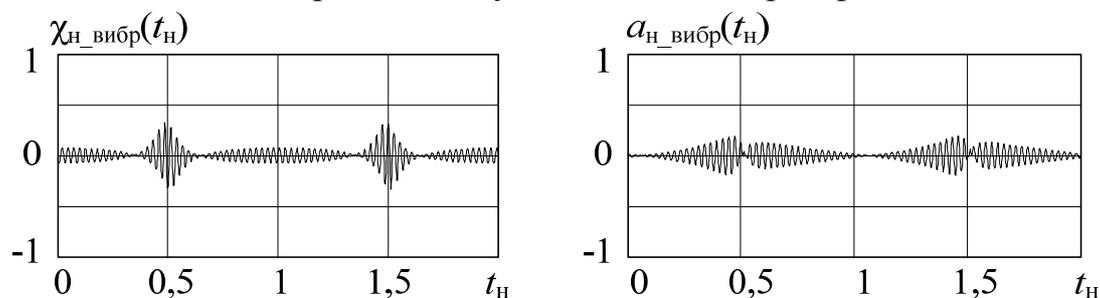


Рис. 2. Составляющие ЧХА $\chi_н(t_н)$ и АХА $a_н(t_н)$ обусловленные вибрационным перемещением точечного объекта

Периодическое изменение амплитуды автодинных характеристик $\chi_{н_вибр}(t_н)$ и $a_{н_вибр}(t_н)$ обусловлено равномерным изменением расстояния от генератора до отражающей точки и их зависимостью от величины параметра внешней обратной связи $C_{ос}$.

Показанный в работе «фазовый» подход позволяет достаточно просто учесть как поступательную, так и вибрационную составляющие перемещения контролируемого элемента турбины, а также внутренние свойства автодинного генератора при анализе особенностей формирования автодинного отклика.

В завершение автор выражает признательность профессору кафедры технологии и средств связи УрФУ Носкову В.Я. за руководство работой.

Библиографический список

1. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
2. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика радиоволновых и оптических автодинов. – Саратов: Изд-во СГУ, 2003. 310 с.
3. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов // Радиотехника. 2012. № 6. С. 24–42.
4. Игнатков К. А. Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона. Диссертация канд. техн. наук. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. 2014. 168 с.

УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГИБРИДНЫХ ВОЛН В МУЛЬТИФЕРРОИДНОЙ СТРУКТУРЕ

*К.В. Бубликов, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, Ю.П. Шараевский*¹
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: olorin91@gmail.com

В настоящее время актуальной задачей является создание управляемых микроразмерных устройств СВЧ-диапазона радиоволн [1]. Одним из вариантов решения данной задачи является применение планарной технологии изготовления слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик. На основе таких структур проектируются управляемые ответвители мощности, фазовращатели, линии задержки и фильтры [2]. При этом управление выходными характеристиками происходит как за счет изменения величины внешнего магнитного поля, так и путем изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя [3, 4].

В структурах, ограниченных в поперечном направлении, при изменении вышеуказанных управляющих параметров для парциальной системы сегнетоэлектрического волновода изменяется модовый состав замедленных электромагнитных волн. Это вызвано как изменением рабочей полосы частот, так и значением критических частот этих мод. При этом в работе [5] показано, что от модового состава волн парциальных систем существенно зависят волновые характеристики структур. Таким образом, при проектировании управляемых микроразмерных мультиферроидных устройств необходимо учитывать изменение модового состава парциальных систем в диапазоне изменения управляющих параметров и его влияние на волновые характеристики.

В данной работе методом конечных элементов в частотной области произведен электродинамический анализ собственных мод волн парциальных систем и гибридных волн мультиферроидной структуры. Рассчитаны значения критических частот в зависимости от изменения управляющих параметров и от соотношения размеров сегнетоэлектрического слоя.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (16-37-60093, 16-37-00217, 14-02-00976) и стипендии (СП-313.2015.5) и гранта (МК-5837.2016.9) президента РФ.

Библиографический список

1. *Никитов С.А. и др.* Магноника - новое направление спинтроники и спинволновой электроники// УФН. 2015. Т. 185, № 10. С. 1099-1128.
2. *Ozgur U., Alivov Y., Morkoc H.* Microwave ferrites, part 2: passive components and electrical tuning. // J. Mater. Sci. : Mater. Electron. 2009. V. 20, № 10. P. 911-952.
3. *Демидов В. Е., Калиникоз Б. А.* Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл-сегнетоэлектрик- ферромагнетик-сегнетоэлектрик-металл// Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, В. 7. С. 8-17.

4. Садовников А.В., Бубликов К.В., Бегинин Е.Н., Никитов С. А. Электродинамические характеристики слоистой структуры металл- диэлектрик- сегнетоэлектрик- диэлектрик- металл конечной ширины. // Радиотехника и электроника. 2014. № 59. С. 876- 881.
5. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Bublikov K.V., Grishin S.V., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P. and Nikitov S.A. Brillouin light scattering study of transverse modes coupling in confined YIG/BST multiferroic. // Journal of Applied Physics. 2015. V 118.

РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЕТКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В ДИАПАЗОНЕ 2.4 – 2.483 ГГц ДЛЯ АНТИКОЛЛИЗИОННЫХ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ

*С.Г. Сучков, А.А. Пиловец, С.В. Комков, С.С. Янкин,
В.А. Николаевцев, Ю.А. Шатрова*

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: Pilovets64@mail.ru

Системы радиочастотной идентификации (РЧИ) СВЧ-диапазона на основе пассивных радиочастотных идентификационных меток (РИМ) широко применяются для автоматической бесконтактной регистрации подвижных и неподвижных объектов [1, 2]. Однако более масштабному внедрению систем радиочастотной идентификации препятствует проблема так называемой коллизии кодовых сигналов, возникающая при одновременном нахождении в области излучения ридера нескольких объектов, помеченных РИМ [3-6].

В рамках данной работы проведено теоретическое и экспериментальное исследование антиколлизийной системы радиочастотной идентификации в ISM диапазоне частот (2.4 – 2.483 ГГц) с использованием РИМ на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с дискретно-временным кодированием. Показана возможность одновременного распознавания до 100 близко расположенных объектов, удаленных от ридера на расстояние до 20 м.

Расчет топологии и электрических характеристик РИМ на ПАВ был выполнен с помощью программного комплекса “COMSOL Multiphysics”, [7-9]. При расчетах учитывалась конечная толщина электродов, отличие акустических свойств плёночных структур из алюминия с примесью меди (4%) [10] от объемного алюминия, а также рассеяние энергии ПАВ в объем [11].

Металлизированные структуры РИМ были изготовлены по технологии “lift-off” [12] из алюминия с примесью меди (4%) с использованием установки электронно-лучевой литографии высокого разрешения.

Для РИМ изготовлены приемопередающие антенны (рис. 1), спроектированные с учетом ёмкостного характера импеданса метки.

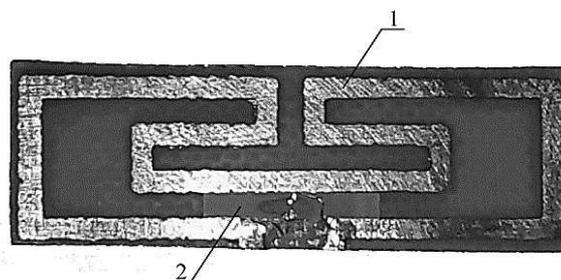


Рис. 1. Фотография разработанной РИМ с антенной: 1 – антенна, 2 – кристаллический чип РИМ на ПАВ.

Антиколлиззионные свойства исследовались для массива из семи РИМ с близкими (для проверки разрешающей способности) кодами № 5, 9, 11, 17, 21, 32 и 38.

В качестве ридера использовался анализатор цепей (мощность внутреннего генератора 2 мВт) с антенной системой из двух направленных Wi-Fi-антенн с габаритными размерами $10 \times 10 \text{ см}^2$ и коэффициентами направленности $K_n = 14 \text{ дБи}$.

Массив из семи РИМ располагался на расстоянии около 6 м от ридера. Временная характеристика одновременного ответа на радиоимпульс опроса всех семи РИМ представлена на рис. 2.

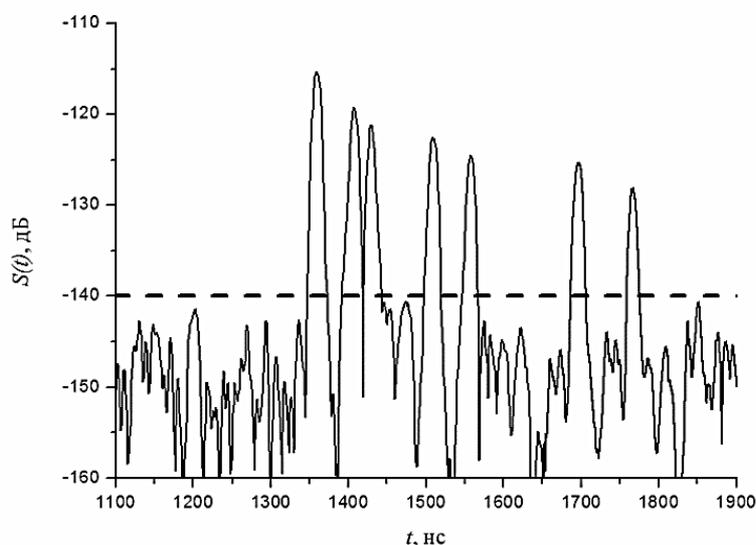


Рис. 2. Временная амплитудная характеристика $S(t)$ одновременного отклика семи антиколлиззионных РИМ (с кодами № 5, 9, 11, 17, 21, 32 и 38). Штриховой линией обозначена чувствительность ридера.

Видно, что все семь кодовых импульсов однозначно идентифицируются, что указывает на возможность практической реализации такой антиколлиззионной системы.

Из экспериментальных результатов следует, что при использовании ридера с чувствительностью приемника -140 дБм и мощностью генератора 100 мВт возможна одновременная идентификация массива из 100 РИМ на расстоянии до 20 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 16-32-00046 мол_а.

Библиографический список

1. *Turcu C. Development and Implementation of RFID Technology.* - Vienna: I-Tech, Austria, 2009. 554 p.
2. *Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters.* - L.: Academic Press, 2007. 448 p.
3. *Malocha D., Gallagher M., Fisher B. et al. A Passive Wireless Multi-Sensor SAW Technology Device and System Perspectives // Sensors.* 2013. V. 13. P. 5897.
4. *Stelzer A., Pichler M., Scheiblhofer S., Schuster S. Identification of SAW ID-tags using an FSCW interrogation unit and model-based evaluation // IEEE Trans.,* 2004. V. UFFC-51, № 11. P. 1412.
5. *Reindl L., Scholl G., Ostertag T. et al. Theory and application of passive SAW radio transponders as sensors // IEEE Trans.* 1998. V. UFFC-45, № 5. P. 1281.
6. *Hartmann C., Hartmann P., Brown P. et al. Anti-collision methods for global SAW RFID tag systems // Proc. 2004 IEEE Int. Ultrasonics Symp. Montreal - 2004.* -N.Y.: IEEE, 2004. 805p.
7. *Гуляев Ю.В., Сучков С.Г., Янкин С.С. и др. Радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах в диапазоне частот 6 ГГц // РЭ.* 2015. Т. 60, № 4. С. 429.
8. *Graczykowski B. The reflection of Rayleigh surface waves from single steps and grooves // Journal of Applied Physics.* 2012. V. 112, № 10, P. 103520.
9. *Darinskii A.N., Weihnacht M., Schmidt H. Surface acoustic wave scattering from steps, grooves, and strips on piezoelectric substrates // IEEE Trans.* 2004. V. UFFC-57, № 9. P. 2042.
10. *Сучков С.Г., Баринов Д.А. Анизотропия упругих свойств тонких металлических пленок и ее влияние на характеристики устройств на ПАВ // РЭ.* 2002. Т. 47, № 4. С. 510.
11. *Сучков С.Г., Янкин С.С., Никитов С.А., Шатрова Ю.А. Рассеяние поверхностных акустических волн на системе топографических неоднородностей, сравнимых с длиной волны // РЭ.* 2014. Т. 59, № 4. С. 405.
12. *Rosenfield M., Thomson M., Coane P. et al. Electron-beam lithography for advanced device prototyping: Process tool metrology // Journal of vacuum science & technology.* В. 1993. V. 11, № 6. P. 2615.

5. ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СВЕХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ВАКУУМНОГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОФОТОДИОДА С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМ УГЛЕРОДНЫМ ЭМИТТЕРОМ

Г.Г. Акчурин, А.Н. Якунин, Н.П. Абаньшин, Ге.Г. Акчурин

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: akchuringg@mail.ru

Предложен способ создания вакуумного туннельного микрофотодиода при облучении $S\alpha$ углеродного эмиттера в виде встречно-штырьевых нанолезвий излучением видимой и ближней ИК области спектра, потенциально позволяющий детектировать оптическую несущую с терагерцовой модуляцией. В отличие от сверхбыстродействующих полупроводниковых фотодиодов, постоянная времени которых составляет сотни и десятки пикосекунд, используемых в оптических линиях связи, вакуумный туннельный фотодиод с характерным расстоянием эмиттер-анод порядка одного микрона в сильном электростатическом поле потенциально должен обладать быстродействием от единиц пикосекунд до сотен фемтосекунд.

В настоящее время скорость передачи информации по одномодовому оптическому волокну достигает 40 Гбт/с в ближней ИК области спектра (1.55 мкм) и ограничена в основном быстродействием используемых индий-арсенид-галиевых фотодиодов [1]. Создание фотодиодов с регулируемой спектральной полосой на основе квантово-размерного графена позволяет надеяться на увеличение скорости детектирования вследствие максимальной подвижности носителей при детектировании последовательности оптических импульсов [2]. Известен оптоэлектронный метод (“timedomain”) получения терагерцовых колебаний при облучении полупроводниковых структур последовательностью фемтосекундных лазерных импульсов [3]. При детектировании оптических импульсов типичная длительность возбуждаемых электрических импульсов составляет величину порядка одной пикосекунды.

Известен способ создания сверхскоростного вакуумного фотодетектора на основе металлического наноструктурированного острейного эмиттера при детектировании фемтосекундных лазерных импульсов гигаваттной мощности с длиной волны 800 нм. Возникновение фотоотклика связывается с нелинейным трехфотонным процессом. Однако данный нелинейно-оптический способ фотодетектирования может быть реализован только для лазерных импульсов с гигаваттной мощностью [4].

Недавно экспериментально обнаружен и детально исследован туннельный фотоэффект в микродиоде с локализацией электростатического поля на эмиттере углеродной наноразмерной структуры [5]. Экспериментально обнаружено, что при облучении углеродного эмиттера лазерными или светодиодными пучками фотонов с низкой энергией (меньше работы выхода) в спектральном диапазоне от ближнего УФ (380 nm) до ближнего ИК (1550 nm) микро и милливаттной оптической мощности возможно инициирование туннельного фототока за счет управления напряженностью поля в зазоре "эмиттер-анод". Использование модифицированного уравнения Фаулера-Нордгейма для описания неравновесных фотоэлектронов позволяет интерпретировать наблюдаемое явление. В основе способа создания сверхскоростного и сверхширокополосного вакуумного туннельного фотодиода в УФ, видимой и ИК спектральной области на основе наноструктурного эмиттера лежит обнаруженный авторами туннельный фотоэффект при энергиях фотонов, существенно меньших работы выхода электрона из эмиттера, который может наблюдаться в случае формирования сильного электростатического поля в межэлектродном промежутке «эмиттер-анод». Физический механизм обнаруженного авторами туннельного фотоэффекта в сильных электростатических полях заключается в возможности управления вероятностью туннелирования неравновесных фотоэлектронов, возникающих вследствие поглощения фотонов с энергией $h\nu$, и их квантовое туннелирование через потенциальный барьер «металл-вакуум» при уменьшении его высоты и ширины с помощью сильного электростатического поля при учете эффекта Шоттки. Использование предложенной модели для оценки влияния сильных электростатических полей с напряженностью в диапазоне 10^7 - 10^8 В/см показало, что высотой и шириной потенциального барьера можно эффективно управлять, уменьшая их в несколько раз с повышением напряженности поля вплоть до режима возникновения фото и автоэмиссионного электрического пробоя. Использование модифицированной модели полевой электронной эмиссии Фаулера-Нордгейма, учитывающей изменение уровня Ферми для неравновесных фотоэлектронов, позволяет получить соотношение, определяющее изменение энергетического расстояния от уровня Ферми до вершины потенциального барьера для неравновесных электронов, поглотивших энергию фотонов $h\nu$

$$\Delta\varphi=A-h\nu-(e^3\beta U/Z)^{1/2}, \quad (1)$$

где: A - работа выхода электронов с поверхности эмиттера (в электрон-вольтах); $1240/\lambda=hc/\lambda=h\nu$ - энергия фотона, в эВ, облучающего эмиттер и вызывающего туннельный фотоэмиссионный ток; λ - детектируемая длина волны оптического излучения (в нм); h - постоянная Планка; c - скорость света; e - заряд электрона; β - форм-фактор усиления локальной напряженности электростатического поля; U - разность потенциалов внешнего электростатического поля на зазоре Z эмиттер-анод.

Выражение (1) позволяет оценить те значения напряженности полей $F=\beta\cdot U/Z$, соответствующих вероятности туннелирования неравновесных фотоэлектронов электронов, стремящихся к 1, что соответствует в случае оптического облучения эмиттера с энергией фотона $h\nu$ условию фотоэмиссионного насыщения. Из соотношения (1) нетрудно получить выражение для максимально допустимого напряжения на аноде, соответствующего максимальному быстродействию вакуумного туннельного фотодиода:

$$U_{\max}\leq 10^3(A-1240/\lambda)^2\cdot Z/\beta. \quad (2)$$

Рассматривая движение электронов в вакуумных электронно-лучевых приборах и, используя закон сохранения энергии в случае нерелятивистского приближения (напряжение U менее 10^4 вольт), нетрудно получить выражение для скорости электронов

$$v=(2eU/m)^{1/2}=5,93\cdot 10^5U^{1/2}(\text{м/с}), \quad (3)$$

из которого, используя соотношение (3), получаем выражение для оценки времени пролета электрона между эмиттером и анодом τ при известном расстоянии между ними Z ,

$$\tau=Z/v\leq 1,68\cdot 10^{-12}Z/U^{1/2}, \quad (4)$$

где τ - время быстродействия туннельного фотодиода (в сек); U - разность потенциала эмиттер - анод (в вольтах); Z - расстояние эмиттер - анод (в микронах).

Таким образом, при типичных экспериментальных напряжениях на аноде не превышающих сотни вольт, постоянная времени вакуумных туннельных микрофотодиодов может составлять сотни фемтосекунд.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 16-19-10455.

Библиографический список

1. Салех Б., Теїх М. *Оптика и фотоника*. -Долгопрудный: Интеллект. 2012.Т.2. 784 с.
2. Tsujino S., Beaud P., Kirk E., Vogel T., Sehr H., Gobrecht J. and Wrulich A. Ultrafast electron emission from metallic nanotip arrays induced by near infrared femtosecond laser pulses // *Appl. Phys. Let.* 2008. V. 92. 193501.

3. *Limmer T., Feldmann J., Da Como E.* Carrier Lifetime in Exfoliated Few-Layer Graphene Determined from Intersubband Optical Transitions // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. 217406.
4. *Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications. Ed. D. Saeedkia.* - Woodhead Publishing Series in Electronics and Optical Materials. 2013. N. 34. 640 p.
5. *Акчурина Г.Г., Якунин А.Н., Абаньшин Н.П., Б.И. Горфинкель Б.И., Акчурина Г.Г. мл.* О возможности управления красной границей туннельного фотоэффекта в углеродных наноразмерных структурах в широком диапазоне длин волн - от ультрафиолетового до инфракрасного // *Письма в ЖТФ.* 2013. Т. 39, В. 12. С. 8-16.
6. Патент RU 2546053. Способ создания сверхбыстродействующего вакуумного туннельного фотодиода с наноструктурированным эмиттером // *Акчурина Г.Г., Якунин А. Н., Абаньшин Н.П., Акчурина Г.Г.* Опубл.10.04.2015. Бюл.№10.

ПЛАЗМОННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ХРАПОВИКА В НЕОДНОРОДНОМ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ГРАФЕНЕ

К.В. Машинский¹, Д.В. Фатеев², В.В. Попов^{1,2,3}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН.

³Саратовский научный центр РАН
E-mail: konstantin-m92@yandex.ru

В последнее время, активно изучается плазмонное детектирование терагерцового (ТГц) излучения в двумерных электронных системах (2МЭС), экранированных решеточным затвором [1]. Плазмонное детектирование ТГц излучения в периодических графеновых структурах вызывает большой интерес вследствие уникальных свойств этого естественного двумерного материала – высокой подвижности носителей заряда при комнатной температуре и линейного энергетического спектра носителей заряда. Помимо плазмонных конвекционной и токовой нелинейностей, свойственных традиционным 2МЭС [2], в графене возникает нелинейность динамической массы носителей заряда [3].

В данной работе разработана теория плазмонного детектирования в пространственно неоднородном графене и предсказан эффект выпрямления ТГц излучения за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного храповика.

Рассмотренная структура представляет собой графен, экранированный двойным металлическим решеточным затвором. Две подрешетки затвора сме-

щены в плоскости друг относительно друга для создания асимметрии элементарной ячейки (рис. 1). Прикладываемое постоянное напряжение между электродами одной из подрешеток и графеном, создаёт в графене пространственно-неоднородное распределение энергии Ферми ε_F . В зависимости от знака приложенного напряжения, графен может иметь электронный или дырочный тип проводимости в подзатворной области. Нормально падающая ТГц волна резонансно возбуждает плазмоны в графеновой структуре с двойным решеточным затвором.

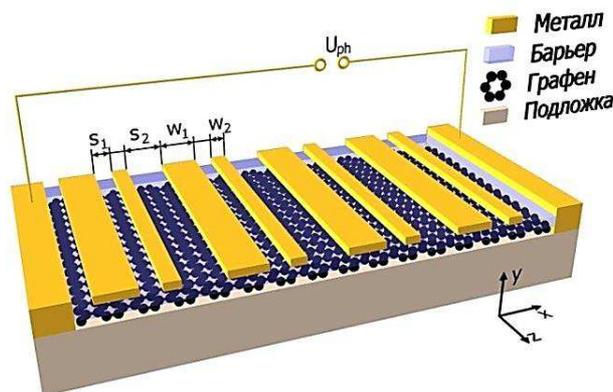


Рис.

1. Схематическое изображение графеновой структуры с металлическим решеточным затвором

Нелинейные свойства носителей заряда в графене могут быть описаны гидродинамическими уравнениями [4]. Гидродинамические уравнения решены с использованием теории возмущения [5] путем разложения скорости носителей заряда V , энергии Ферми и плотности тока j по степеням амплитуды действующего электрического поля с сохранением только линейных и квадратичных членов разложения. Используются приближения нулевой температуры и малой скорости носителей заряда $V < v_F$, где $v_F = 10^6$ м/с – скорость Ферми.

В рамках самосогласованного электродинамического подхода [6] вычислены электрические поля плазмонов, возбуждаемые падающей ТГц волной, в рассматриваемой графеновой структуре. Для гармонического электрического поля полный выпрямленный ток в пространственно периодическом графене может быть записан в виде

$$j_0 = \frac{|e|^3 v_F^2}{\hbar^2 \pi \omega \gamma (\omega^2 + \gamma^2)} \left\langle \text{sgn}(e) \text{Re} \left((2\omega + i\gamma) E_\omega \frac{\partial (E_\omega)^*}{\partial x} \right) \right\rangle, \quad (1)$$

где $|e|$ – элементарный заряд ($e < 0$ для электронов, $e > 0$ для дырок), γ – скорость релаксации носителей заряда, а угловые скобки обозначают пространственное усреднение.

Выпрямленный ток в графене (1) возникает в случае сильной пространственной асимметрии электрического поля, что может быть достигнуто в плаз-

монных структурах с двойным решеточным затвором [7] (эффект плазмонного увлечения носителей заряда), а также в случае создания в элементарной ячейке периодического графена с основной (например, электронной) проводимостью участка с неосновной (дырочной) проводимостью, расположенного асимметрично относительно пространственного распределения поля в возбужденной плазмонной моде (эффект плазмонного электронно-дырочного храповика).

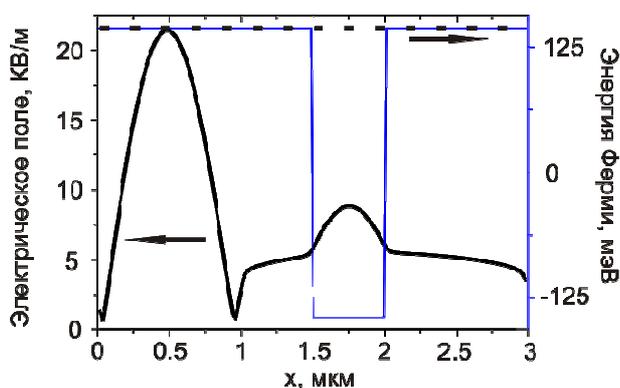


Рис. 2. Распределение электрического поля и энергии Ферми в элементарной ячейке графена однородном (пунктирная линия) и неоднородном (сплошная линия) случае при $\omega = 1.446$ ТГц

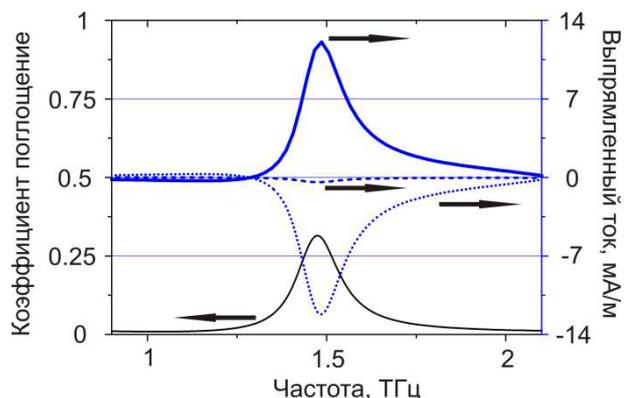


Рис. 3. Коэффициент поглощения и плотность выпрямленного тока в зависимости от частоты при $\gamma = 5 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Сплошная линия соответствует плотности выпрямленного тока в неоднородном графене, пунктирная линия - в однородном графене, точечная линия - их разности

В рассматриваемой структуре с пространственно однородным распределением равновесной энергии Ферми $\varepsilon_F(x) = 143 \text{ мэВ}$ в элементарной ячейке (рис.2) выпрямление ТГц излучения происходит только за счет эффекта плазмонного увлечения носителей заряда (рис.3). Приложение напряжения к затворной подрешетке с узкими электродами создает энергию Ферми $\varepsilon_{F, \text{ш}_2} = -143 \text{ мэВ}$ в подзатворном участке графена ш_2 , что приводит к одновременному действию обоих эффектов плазмонного выпрямления. Поскольку проводимость графена не зависит от типа носителей заряда, а зависит только от их концентрации, то вычисленное поле плазмонов одинаково в рассматриваемых однородной и неоднородной структурах (рис. 2), и, следовательно, разность выпрямленных токов (рис. 3) позволяет вычислить ток плазмонного электронно-дырочного храповика (рис. 3), который оказывается на два порядка больше тока плазмонного увлечения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-02-02989) и Гранта президента Российской Федерации (грант №. МК-5447.2016.2).

Библиографический список

1. *Popov V.V.* Plasmon excitation and plasmonic detection of terahertz radiation in the grating-gate field-effect-transistor structures // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 2011. V. 32. P. 1178-1191.
2. *Popov V.V.* Terahertz rectification by periodic two-dimensional electron plasma // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. P. 253504-253505.
3. *Olbrich P., Kamann J., König M., Munzert J.* Terahertz ratchet effect in graphene with a lateral superlattice // *Phys. Rev. B*. 2016. V. 93. P. 075422-075437.
4. *Rudin S.* Non-linear plasma oscillations in semiconductor and Graphene channels and application to the detection of terahertz signals // *Int. J. High Speed Electron. and Systems*. 2011. V. 20(3). P. 567-583.
5. *Aizin G.R., Fateev D.V., Tsymbalov G.M., Popov V.V.* Terahertz plasmon photoresponse in a density modulated two-dimensional electron channel of a GaAs/AlGaAs field-effect transistor // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 163507-163509.
6. *Фатеев Д.В., Понов В.В., Шур М.С.* Трансформация плазмонного спектра в транзисторной структуре с решеточным затвором и пространственно-модулированным двумерным электронным каналом // *ФТП*. 2010. Т. 44(11). С. 1455-1462.
7. *Popov V.V., Fateev D.V., Ivchenko E.L., Ganichev S.D.* Noncentrosymmetric plasmon modes and giant terahertz photocurrent in a two-dimensional plasmonic crystal // *Phys. Rev. B*. 2015. V. 91. P. 235436-235443.

ПОЛОСНОПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР И КОМПОЗИТНОГО НАНОМАТЕРИАЛА

С.Ю. Молчанов, Н.М. Ушаков, С.А. Алавердян, В.П. Мещанов
Саратовский государственный технический
университет им. Гагарина Ю.А.

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук
Центральный научно-исследовательский институт
измерительной аппаратуры
E-mail: canishe@yandex.ru, nmu@bk.ru

Измерен коэффициент передачи многослойного полосового фильтра на основе полимерного нанокompозитного материала и металлическими слоями с периодически повторяющимися вырезами в виде крестов в диапазоне 0,075-0,26 ТГц (THz). Даны сравнение данного фильтра с его теоретической моделью, конкурентные преимущества и недостатки по сравнению с аналогами.

Освоение терагерцового (THz) диапазона является приоритетным направлением для высокочастотных систем. Технологические успехи в создании качественных элементов будут определять уровень развития всей миллиметровой

техники. Технологически важной задачей является разработка полосно-пропускающих фильтров с малыми собственными потерями в заданной полосе пропускания и хорошей крутизной спада [1].

В настоящее время пассивные фильтры THz диапазона имеют следующие параметры [2]:

- минимальное (собственное) ослабление на центральной частоте -1 дБ (дБ);
- полоса пропускания по уровню -3дБ не более 15-20% от центральной частоты фильтра.

Для современных потребностей крутизны фильтра недостаточно. Для улучшения спада в зоне непропускания нужно использовать каскад из 2-х фильтров [3,4]. В работе [5] с помощью компьютерного моделирования удалось подобрать диэлектрическую вставку в виде полимерного нанокompозитного образца, которая позволяет улучшить крутизну каскада полосовых фильтров, не приводя к значительному увеличению собственного ослабления.

Синтезированный полимерный нанокompозитный образец по моделям, рассматриваемым в [6] имеет $\varepsilon \approx 2$ и $\text{tg}\delta \approx 0.02$. Он заключен между проводящими металлическими поверхностями с апертурными элементами в виде крестов (Рис.1).



Рис. 1. Полосовой фильтр с центральной частотой 0,14 ТГц

Для измерения коэффициента передачи полосового фильтра использовалось следующее оборудование фирмы Rohde&Schwarz: векторный анализатор цепей ZVA-40 и 3 пары преобразователей частоты (ZVAZ-110, ZVAZ-170 и RPG-260), работающие в диапазонах 75-110, 110-170 и 170-260 ГГц (GHz) соответственно. Таким образом, данное оборудование позволяет измерять S-матрицу рассеяния на довольно большом частотном отрезке, равным 185 ГГц.

Пошаговая калибровка оборудования происходила после его полного прогрева согласно технической документации (около 30 минут) с использованием известных калибровочных мер фирмы Rohde&Schwarz (KalibrationkitWR10, WR6, WR4 соответственно для ZVAZ-110, ZVAZ-170 и RPG-260).

Измерение коэффициента передачи полосового фильтра проводилось в открытом пространстве по коэффициенту прохождения электромагнитной волны S21 матрицы рассеяния (S-matrix) Рис.2. После калибровки методика изме-

рений сводилась к следующему: между двух рупорных антенн, прикрепленных к волноводным секциям преобразователей частот, расположенных напротив друг друга, помещался полосовой фильтр. Зависимость ослабления прошедшей через фильтр волны от частоты наблюдали на экране векторного анализатора. Погрешность измерений векторного анализатора и преобразователей частоты фирмы Rohde&Schwarz составляет не более 0,2 дБ.



Рис. 2. Измерение полосового фильтра в открытом пространстве

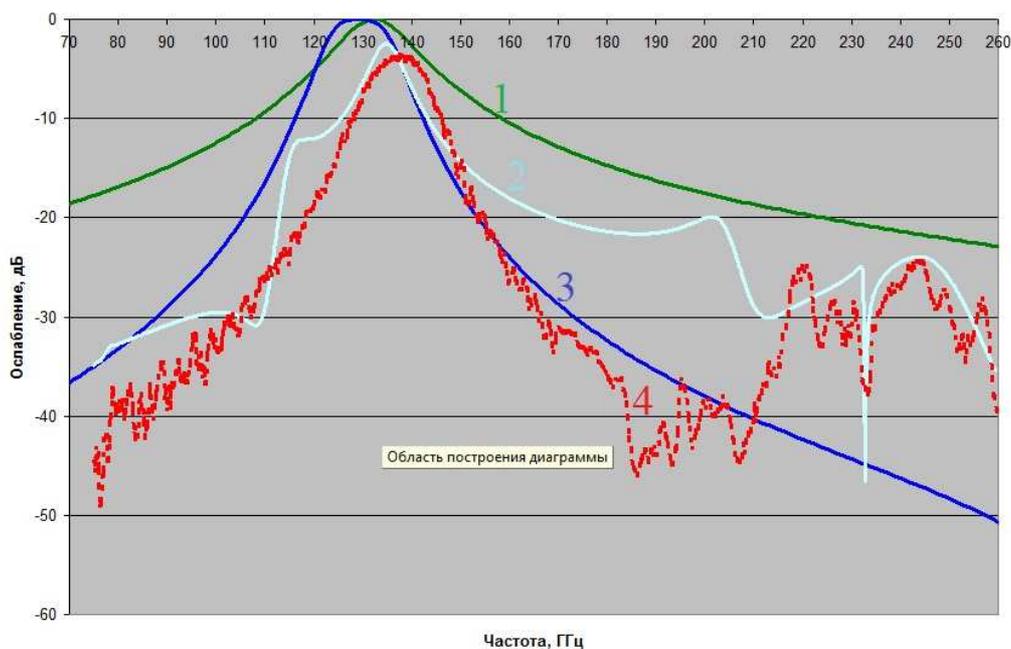


Рис. 3. Коэффициент передачи многослойного фильтра

Измеренный коэффициент передачи полосового фильтра на основе периодической многослойной структуры и полимерного нанокompозитного материала приведен на Рис. 3 (кривая 4). Собственное ослабление полосового фильтра на центральной частоте $f_{ц}=138.8$ ГГц порядка 4дБ. Полоса пропускания по уровню -3дБ от центральной частоты менее 12 ГГц, т.е. меньше 9% от $f_{ц}$. Также на Рис. 3 изображены 3 теоретические кривые:

1. Теоретическая кривая двухслойного фильтра без прослойки;

2. Теоретическая кривая двухслойного фильтра с прослойкой из полимерного нанокompозитного образца определенной толщины;

3. Теоретическая кривая двухслойного фильтра с воздушной прослойкой определенной толщины.

Рассогласованность между теоретической моделью и экспериментальным образцом можно объяснить недостаточной юстировкой при сборке образца и не точным вычислением комплексной диэлектрической проницаемости при моделировании. Стоит отметить, что фильтр с нанокompозитным образцом имеет малое собственное ослабление и узкую полосу пропускания в области длины волны равной 2 мм.

Конкурентными преимуществами измеренного фильтра является узкая полоса пропускания по уровню -3дБ, 12 ГГц против 13,4 ГГц у фильтра с воздушной прослойкой [4,7] и меньшая толщина прослойки, согласно [8].

Для уменьшения собственных потерь фильтра и увеличения крутизны спада требуется создание нового нанокompозитного материала с меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь в области пропускания фильтра и с большим его значением в на других частотах.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Библиографический список

1. *Оборина Л.И., Романов А.Е., Исмаилов Б.К., Стерехов И.В., Трифанов И.В.* Технологические особенности изготовления полосно-пропускающих фильтров, работающих в СВЧ-, КВЧ-диапазонах // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Решетнева М.Ф., Красноярск. 2010. В. 2. С.125.
2. *Kropotov G.I., Tsygankova E.V.* TУDEX: optics for THz photonics // Вестник Новосибирского Государственного Университета, серия: Физика. 2010. Т.5, №4. С. 113.
3. *Munk В.А.* Frequency Selective Surfaces: Theory and Design // Wiley, New York. 2000. P.153.
4. *Алавердян С.А., Молчанов С.Ю., Довгань А.И., Креницкий А.П., Мещанов В.П.* Исследование и разработка полосовых фильтров диапазона 0,1-0,2 ТГц // Материалы Всероссийской научной школы-семинара «Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро и наноструктурами, материалами и биообъектами», Саратов. 2014. С. 207.
5. *Молчанов С.Ю., Ушаков Н.М.* Создание узкополосного фильтра терагерцового диапазона на основе нанокompозитных материалов и частотно-селективных проводящих поверхностей // Москва, Радиотехника. 2015. №7. С.55.
6. *Ушаков Н.М., Молчанов С.Ю.* Моделирование диэлектрических свойств толсто пленочных полимерных нанокompозитов на основе полиэтилена низкой плотности в УВЧ-, СВЧ- и КВЧ-диапазонах радиоволн // Москва, Радиотехника. 2014. №10. С63.
7. *Молчанов С.Ю., Ушаков Н.М.* Узкополосный СВЧ фильтр для миллиметрового диапазона длин волн // Материалы VII международной научно-практической конференции «Академическая наука – проблемы и достижения», USA, SC, NorthCharleston, CreatSpace. 2015. Т.1.С.162.
8. *Tarasov M.A., Gromov V.D., Bogomolov G.D., Otto E.A, Kuzmin L.S.* Fabrication and characteristics of mesh band-pass filters // Instruments and Experimental Techniques. 2009. V. 52, N. 1. P. 74.

ИК СПЕКТРОСКОПИЯ ЗАМЕЩЕННЫХ β -D-ГЛЮКОЗЫ

Л. М. Бабков, И. В. Ивлиева, М. В. Королевич¹,
Е. А. Моисейкина, О. А. Плеханова²

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

¹Белорусский государственный аграрный технический университет

²Саратовский государственный аграрный университет им. В.И.Вавилова

E-mail: Irine09@yandex.ru

Терагерцовое и инфракрасное излучения находятся в одном диапазоне шкалы частот. Пройдя через вещество, они содержат в себе информацию о динамике, строении, внутримолекулярном и межмолекулярном взаимодействиях в исследуемом образце. Эта информация является предметом научного исследования фундаментального характера.

В настоящем сообщении представлены результаты такого исследования. Объекты исследования - замещённые β -D-глюкозы: метил- β -D-глюкопиранозид [1,2] и 2,3-ди-O-нитро-метил- β -D-глюкопиранозид [3,4] - биополимеры (моносахариды), имеющие важное прикладное значение. Формально переход от β -D-глюкозы к метил- β -D-глюкопиранозиду осуществляется замещением атома водорода одной из гидроксильных групп метильной группой, переход к 2,3-ди-O-нитро-метил- β -D-глюкопиранозиду - замещением атомов водорода двух гидроксильных групп нитрогруппами. Анализ экспериментальных спектров ИК поглощения (ИКС) этих веществ [1,3] с целью их интерпретации без привлечения теории мало эффективен из-за их сложности. Цель данной работы – теоретическая интерпретация ИКС метил- β -D-глюкопиранозид и 2,3-ди-O-нитро-метил- β -D-глюкопиранозид, выяснение влияния на их строение и спектры заместителя и водородной связи.

Методом теории функционала плотности B3LYP/6-31G(d) проведено моделирование строения и ИКС молекул (см. рис.1) и их простейших Н-комплексов, представляющих собой димеры. В Н-комплексе I метил- β -D-глюкопиранозид протон Н24' (штрихом отмечены атомы второй молекулы димера) обобществляется между атомами кислорода О12 и О12'.

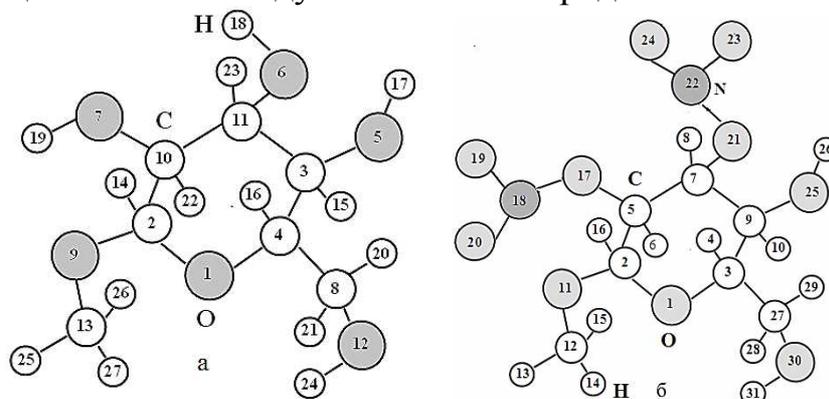


Рис.1. Строение молекул метил- β -D-глюкопиранозид(а) и 2,3-ди-O-нитрометил- β -D-глюкопиранозид(б)

В Н-комплексе II протон 17' обобществляется между кислородами 5' и 7, протон 18 – между кислородами 6 и 6'. В Н – комплексе III протон 19 обобществляется между атомами кислорода 6' и 7, протон 17' - между атомами кислорода 5' и 7, и протон 18- между атомами кислорода 6 и 12'. В Н-комплексе IV 2,3-ди-О-нитрометил-β-D-глюкопиранозида протоны 31 и 31' обобществляются между кислородами 25', 30 и 25, 30' гидроксильных групп. В Н-комплексе V протон 31' обобществляется между кислородами 30 и 30', в Н-комплексе VI протон 31 обобществляется между кислородами 30 и 25'. Рассчитаны энергии, геометрические, электрооптические и механические параметры молекулярных систем.

Неплоское пиранозное кольцо имеет конформацию "кресло" во всех соединениях. Различие его геометрий незначительно: при комплексообразовании изменения его длин связей не превышают 0,01 Å. Суммарная энергия Н-связей 2,8, 5,4 и 7,5 ккал/моль для Н-комплексов I, II и III и 8,7, 5,7 и 10,2 ккал/моль для Н-комплексов IV, V и VI.

Нитрогруппы в отличие от метильной группы активизируют большинство нормальных колебаний пиранозного кольца в молекуле 2,3-ди-О-нитрометил-β-D-глюкопиранозида. В области 850—890 см⁻¹ проявляются полосы, отнесённые к плоским деформационным γ(O-N=O) и валентным Q(O-N) колебаниям, в которые вносят значительный вклад деформационные координаты пиранозного кольца. Характерным спектрально-структурным признаком 2,3-ди-О-нитрометил-β-D-глюко-пиранозида являются полосы в области 1620—1700 см⁻¹ измеренного ИКС. Интенсивному дублету с максимумами 1635, 1650 см⁻¹ соответствуют валентные колебания Q(N=O) с рассчитанными частотами 1766 см⁻¹ и 1775 см⁻¹, значения которых завышены, из-за ограниченности гармонического приближения и модели изолированной молекулы.

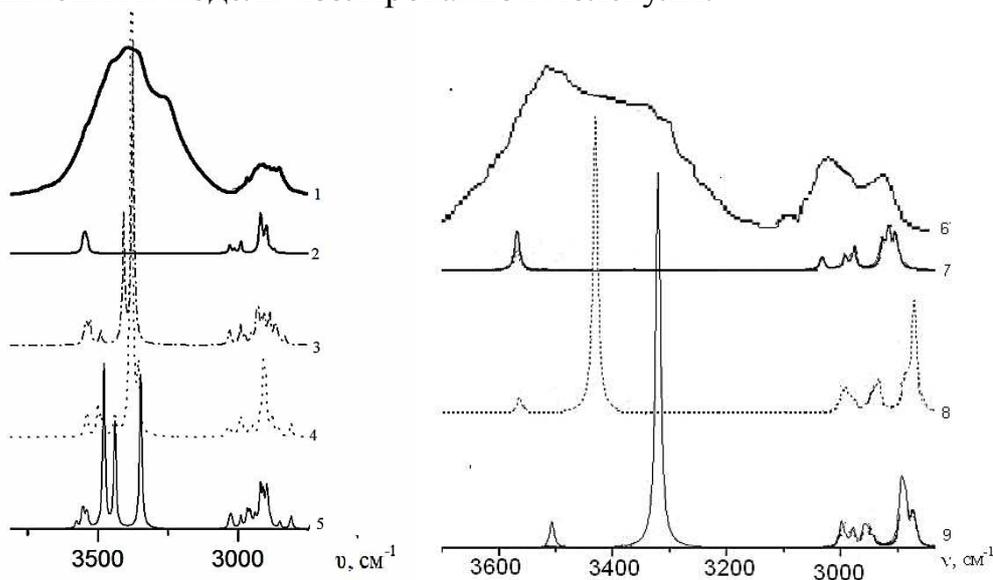


Рис.2. ИК спектры метил-β-D-глюкопиранозида и 2,3-ди-О-нитрометил-β-D-глюкопиранозида

При комплексобразовании частоты молекулы расщепляются, к ним добавляются частоты колебаний водородного мостика. Полосы ИКС, являющиеся спектрально-структурными признаками 2,3-ди-О-нитрометил-β-D-глюкопиранозида, не испытывают значительного влияния Н-связи.

Широкая полоса сложной формы в области 2800-3500 см⁻¹ измеренных ИКС замещённых β-D-глюкозы с аномально большой интенсивностью есть характерный признак наличия в образце водородных связей. На рис.2. приведены измеренные (1,6) и рассчитанные (2,7- изолированной молекулы, 3, 4, 5, 8, 9 - димеров) ИКС обоих соединений. Рассчитанные интенсивности валентных колебаний q(O-H) при обобществлении протона возрастают на порядок, что качественно согласуется с данными эксперимента, сдвиги частот в длинноволновую сторону лежат в интервалах 60-200 см⁻¹ в метил-β-D-глюкопиранозиде и 108-216 см⁻¹ в 2,3-ди-О-нитро-метил-β-D-глюкопиранозиде.

Анализ результатов расчёта внутримолекулярных параметров и ИКС метил-β-D-глюкопиранозида, 2,3-ди-О-нитро-метил-β-D-глюкопиранозида и их Н-комплексов позволил интерпретировать измеренные спектры и сделать выводы о строении образцов этих биосоединений. Они состоят из димеров, образованных водородной связью средней силы. Не исключено наличие в образцах Н-комплексов более сложного строения. Строение пиранозного цикла, имеющего конформацию "кресло" в свободных молекулах и в Н-комплексах исследованных биообъектов, и его геометрические параметры практически неизменны.

Библиографический список

1. Королевич М.В., Жбанкова М.Р., Пиотухх-Пелецкий В.Н., Жбанков Р.Г. Интерпретация ИК спектра метил-β-D-глюкопиранозида на основе теоретического расчета частот и интенсивностей нормальных колебаний // Журнал структурной химии. 2007. Т.48, №5. С. 880-889.
2. Бабков Л.М., Королевич М.В., Моисейкина Е.А. Расчет структуры и ИК спектра метил-β-D-глюкопиранозида методом функционала плотности с учетом водородной связи. // Журнал прикл. спектроскопии. 2011. Т. 78, №2. С. 223 -228.
3. Королевич М. В., Жбанков Р. Г.. Расчет и анализ частот нормальных колебаний 2,3-ди-О-нитро-метил-β-D- глюкопиранозида.// Журн. прикл. спектр. 1997. Т. 64, №6. С. 724-728.
4. Бабков Л.М., Ивлиева И.В., Королевич М.В. Расчет структуры и ИК спектра 2,3-ди-О-нитро-метил-β-D-глюкопиранозида методом функционала плотности// Журн. прикл. спектр 2015. Т.82, №3. С.331-340.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ЭНДОЭДРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА $A^{+}@C_{60}$

О.Е. Глухова, М.М. Слепченков, В.В. Шунаев

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: slepchenkovm@mail.ru

В настоящее время терагерцовая электроника является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений науки и техники во всем мире. Благодаря появлению новых материалов, обладающих уникальными свойствами, и развитию современных инструментов исследования, оставшийся долгое время неосвоенным терагерцовый диапазон частот электромагнитного спектра обратил на себя внимание взоры научно-исследовательских групп по всему миру. Широкий спектр возможных областей применения терагерцового излучения простирается от спектроскопии биологических образцов и медицинской диагностики до беспроводной связи и определения химического состава вещества. Одной из актуальных задач фундаментальной науки является разработка эффективных способов детектирования волн ТГц диапазона с последующим созданием на их основе приемных широкополосных устройств. Для создания чувствительных приемников ТГц волн используются метаматериалы и пирозлектрические материалы [1,2]. Последние достижения в этой области связаны с использованием углеродных наноматериалов по причине высокой подвижности носителей заряда в таких структурах, а также их уникальных прочностных свойств. Процесс детектирования терагерцовых волн с помощью углеродных наноматериалов осуществляется главным образом посредством плазмонного резонанса [3] и болометрического метода [4]. Однако, каждый из указанных способов не лишен недостатков. К недостаткам метода поверхностного плазмонного резонанса относится узкий рабочий частотный диапазон. Технология болометрического метода подразумевает наличие дополнительного детектирующего элемента, передающего сигнал нанотрубке, а значит, не исключено искажение или частичная потеря передаваемой информации. Других способов детектирования терагерцового излучения на данном этапе развития терагерцовой электроники не предложено.

Разработана новая физическая концепция детектирования ГГц/ТГц-излучения с помощью эндоэдрального комплекса $A^{+}@C_{60}$, где A^{+} – ион атома щелочного металла. Суть новой физической концепции заключается в следующем. Комплекс $A^{+}@C_{60}$ находится в поле удерживающего потенциала углеродной нанотрубки (10,10) и тримера фуллерена C_{60} , контактирующего со стенками трубки при помощи ковалентных связей (рис. 1). Собственная частота колебаний $A^{+}@C_{60}$ составляет 0.57-0.60 ТГц. Заряд с нанотрубки частично перетекает на $A^{+}@C_{60}$. Подвергаясь воздействию электромагнитного поля,

$A^+@C_{60}$ начинает осциллировать в потенциальной яме с большей амплитудой, что приводит к увеличению перетекающего заряда от трубки к фуллерену. Таким образом, дырочная проводимость нанотрубки возрастает (увеличивается концентрация носителей заряда). Всплеск тока фиксируется, соответственно, внешним устройством. Проведено моделирование вынужденных колебаний фуллерена $K^+@C_{60}$ в нанотрубке под действием плоской монохроматической волны, падающей перпендикулярно оси трубки, при различных значениях ее частоты и амплитуды. В качестве инструмента исследования использовался программный пакет KVAZAR [5].

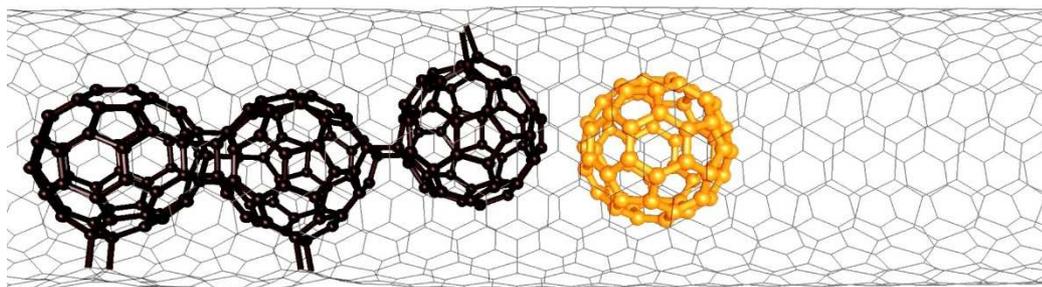


Рис. 1. Атомистическая модель наноустройства, способного детектировать электромагнитные волны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-а №15-07-06307 и стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-3135.2016.1.

Библиографический список

1. Coutaz J.L., Bernier M., Garet F., Joly S., Miyake Y., Minamide H., Lheurette E., Lippens D. Terahertz time-domain spectroscopy of absorbing materials and of meta materials // International Journal of Terahertz Science and Technology. 2014. V. 7. P. 53-69.
2. Spirito D., Coquillat D., De Bonis S.L., Lombardo A., Bruna M., Ferrari A.C., Pellegrini V., Tredicucci A., Knap W., Vitiello M.S. High performance bilayer-graphene terahertz detectors // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 061111-1-061111-5.
3. He X., Fujimura N., Lloyd J.M., Erickson K.J., Talin A.A., Zhang Q., Gao W., Jiang Q., Kawano Y., Hauge R.H., Léonard F., Kono J. Carbon Nanotube Terahertz Detector // Nano Lett. 2014. V. 14 (7). P. 3953-3958.
4. Kroug M., Cherednichenko S., Merkel H., Kollberg E., Voronov B., Gol'tsman G., Huebers H.W., Richter H. NbN hot electron bolometric mixers for terahertz receivers // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. V. 11. P. 962-965.
5. Глухова О.Е., Колесникова А.С., Савостьянов Г.В., Слепченко М.М. ПО «KVAZAR» - платформа для прогностического моделирования в области нано- и биомедицинских технологий - Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2015. 247 с.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ БИООБЪЕКТОВ В X-ДИАПАЗОНЕ

М.К. Мерданов¹, М.Д. Алехин¹, А.П. Зарецкий¹

¹АО «НПО «Электронное приборостроение», г. Москва

E-mail: maksim.alekhin@gmail.com

Неинвазивные методы микроволнового зондирования и визуализации (НММЗВ) биообъектов являются относительно новыми в медико-биологической практике, но имеют широкие перспективы клинического применения. Одним из главных достоинств НММЗВ является возможность получения изображений с высоким пространственным разрешением, отражающих физиологическое состояние органов и тканей организма, без дополнительного использования контрастных веществ. Это связано с тем, что диэлектрические свойства биотканей зависят от их текущего физиологического состояния. Например, опухолевые ткани имеют диэлектрические свойства (комплексная относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость), существенно отличные от нормальных здоровых тканей организма [1].

Информативность исследования таких характеристик биообъекта как комплексная относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость была обоснована ранними работами, в которых отмечается, что изменения электрических параметров биотканей вызывается резонансным поглощением мощности электромагнитного поля полярными молекулами тканей (главным образом белка и воды). Исследования биофизических свойств биообъекта при использовании НММЗВ показали, что на их диэлектрические характеристики существенное влияние оказывает степень гидратации [2].

Чрезвычайно важным, с практической точки зрения приложения НММЗВ биообъекта, является безопасность используемого вида их электромагнитного излучения для организма человека. Это связано как с использованием неионизирующей области спектра, так и с тем, что уровни и дозы диагностического излучения малы (сравнимы с мощностью обычного мобильного телефона). Это позволяет максимально широко использовать НММЗВ в диагностических целях медико-биологической практики, не опасаясь передозировок излучения и кумулятивных, в том числе, канцерогенных, эффектов [3].

Целью применения НММЗВ для исследования головного мозга является детекция и локализация поврежденных участков в результате ишемического или геморрагического инсультов, характеризующихся наличием кровяного тромба или области кровоизлияния в мозг, что проявляется в разнице в диэлектрических свойствах тканей белого и серого веществ головного мозга и крови человека. В эксперименте с использованием реалистичного фантома для анализа были выбраны частоты в диапазоне от 0,5 до 2,5 ГГц, что позволило успешно

зафиксировать наличие участка повреждения ткани головного мозга размером в пределах 2 см [4].

На сегодняшний день одним из наиболее распространенных применений НММЗВ биообъекта является ранняя диагностика рака молочной железы, что возможно в силу высокого диэлектрического контраста между раковыми и здоровыми тканями груди. Использование частотного диапазона от 3,1 до 10,6 ГГц позволило зафиксировать на конфокальном изображении наличие опухоли диаметром 2 мм на глубине 3,1 см от поверхности зондирования [4].

Использование НММЗВ для исследования костных тканей имеет место для случая скрининговой диагностики лейкемии костного мозга, а также определения плотности костной ткани при выявлении остеопороза. Лейкемия вызывает неконтролируемый рост популяции клеток в кости, что приводит к повышению диэлектрической проницаемости и уменьшению проводимости соответствующих участков. В ходе эксперимента были получены реалистичные изображения в целом соответствующие снимкам компьютерной томографии на частотах 0,8 и 1,3 ГГц [4].

Технологии на основе НММЗВ могут быть применимы для оценивая изменений параметров кровотока и кровяного давления при детекции изменения радиуса аорты в процессе сердечных сокращений. В эксперименте было продемонстрирована потенциальная возможность регистрации изменения кровотока конечностей до 0,3% и кровяного давления в пределах 2,5% на средней частоте 2,5 ГГц сверхширокополосной радиолокационной системы [4].

Перспективной областью практического применения НММЗВ является также бесконтактная диагностика крови внутри сосудов. Одной из важных задач в этом направлении является неинвазивный мониторинг уровня глюкозы. В эксперименте для измерения диэлектрической проводимости и проницаемости крови в диапазоне от 1,0 до 10,0 ГГц использовался векторный анализатор цепей. Следует отметить, что подход на основе использования НММЗВ применим при детекции содержания и других аналитов и веществ в крови, обладающих выраженным диэлектрическим контрастом [4].

Исследования диэлектрических свойств компонентов крови на основе применения НММЗВ для случая инфаркта миокарда показали, что изменения биофизических свойств крови проявляются раньше, нежели изменения морфологических, биохимических, гистохимических показателей [4].

Как следует из результатов проведенного ранее исследования, ощутимые изменения диэлектрических показателей крови наблюдаются в случаях заметного изменения количественного или качественного состава крови. Это характерно, например, при проведении лечебного плазмафереза, когда из сосудистого русла удаляется определенное количество плазмы с содержащимися в ней белковыми конгломератами, токсинами, иммунными комплексами или при проведении заместительной терапии белковыми препаратами [4].

Таким образом, перспективные медицинские технологии на основе НММЗВ в области X-диапазона при определении комплексной относительной

диэлектрической проницаемости и проводимости в исследовании свойств крови могут использоваться не только в комплексе ранних скрининговых диагностических мероприятий, но и в качестве методов контроля эффективности проводимого лечения.

Библиографический список

1. *Семенов С.Ю.* Микроволновая томография биологических объектов. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук в форме научного доклада. Москва. 1999. 51 с.
2. *Feldman Y., Ermolina I., Hayashi Y.* Time domain dielectric spectroscopy study of biological systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2003. Vol. 10. Iss. 5. P. 728-753.
3. Биорадиолокация. Коллективная монография под редакцией *Бугаева А.С., Ивашова С.И., Иммореева И.Я.* Москва. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 396 с.
4. *Chandra R., Zhou H., Balasingham I., Narayanan R.* On the Opportunities and Challenges in Microwave Medical Sensing and Imaging. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2015. Vol. 62. Iss. 7. P. 1667-1682.

Научное издание

Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами

Материалы Всероссийской научной школы-семинара

Под редакцией профессора *Д. А. Усанова*

Подписано в печать 11.05.16
Формат 60×84 1/16.
Усл.печ.л. 1697 (18,25). Тираж 100 экз. Заказ

Издательство Саратовский источник.
410012, Саратов, Кутякова, 138Б.
Типография Саратовского университета.
410012, Саратов, Б. Казачья, 112А.