

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

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

*Посвящается 100-летию со дня рождения первого заведующе-
го кафедрой физики твердого тела, профессора, доктора фи-
зико-математических наук Зинаиды Ивановны Кирьяшкиной*

Материалы Всероссийской научной школы-семинара

Под редакцией профессора *Д.А. Усанова*

Саратов

Издательство «Саратовский источник»
2014

УДК 537.5
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, 2014. – 224 с.: ил.
ISBN 978-5-91879-422-7

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 наноэлектронике, 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 978-5-91879-422-7

© Саратовский источник, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 8 |
| 1. ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ | 9 |
| <i>Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль</i> ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ СВЧ ДИАПАЗОНА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР И НАНОКОМПОЗИТОВ..... | 9 |
| <i>Г.А. Емельченко, В.М. Масалов, А.А. Жохов</i> ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ | 13 |
| <i>Д.А.Усанов, С.А.Никитов, А.В.Скрипаль, В.Н.Посадский, В.С.Тяжлов, А.В.Байкин</i> НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА | 16 |
| <i>Е.А. Бондаренко, С.А. Бондаренко, Л.В. Михнев, Д.С. Вакалов, Д.П. Валухов, Е.О. Плеханова, А.В. Пацай</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОПАЛОПОДОБНЫХ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР | 19 |
| <i>Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.П. Фролов, В.Е. Орлов</i> ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ ВОЛНОВОДНАЯ СТРУКТУРА С РАЗРЕШЕННЫМИ И ЗАПРЕЩЕННЫМИ ЗОНАМИ | 21 |
| <i>М.А.Морозова, А.Ю. Шараевская</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПРЕЩЕННЫХ ЗОН В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ | 24 |
| <i>Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, Е.В. Латышева</i> ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЁВ..... | 27 |
| <i>В.С. Горелик, О.А. Троицкий</i> ГЛОБУЛЯРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ, ЗАПОЛНЕННЫЕ ДИЭЛЕКТРИКАМИ И МЕТАЛЛАМИ..... | 30 |
| <i>М. Ю. Захарченко, Ю. Ф. Захарченко</i> МЕТОД РАСЧЕТА ВОЛНОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ..... | 32 |
| <i>В. Т. Ерофеев</i> МОДЕЛЬ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДИПОЛЕЙ ДВУХСЛОЙНЫМ ЭКРАНОМ ИЗ КИРАЛЬНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ..... | 34 |
| 2. ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА | 36 |
| <i>А.И. Михайлов, Р.И. Хабиров, В.Ю. Андреева</i> РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ГЕТЕРОДИНА НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА | 36 |
| <i>Д.А. Усанов, В.Н. Посадский, А.В. Скрипаль, В.С. Тяжлов, Д.В. Григорьев</i> СВЧ-УМНОЖИТЕЛИ ВЫСОКОЙ КРАТНОСТИ..... | 38 |
| <i>М.А.Морозова, О.В.Матвеев</i> СВЯЗАННЫЕ МАГНОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЛИНЕЙНЫХ СВЧ СИГНАЛОВ (МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) | 41 |
| <i>А.Г.Гудков, С.А.Мешков, В.В.Попов</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГИС И МИС СВЧ | 43 |
| <i>А.И. Михайлов, А.В. Митин</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ГАННОВСКОЙ И РЕКОМБИНАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ТОКА В ВЫСОКООМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ..... | 44 |
| <i>Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Романов</i> МЕХАНИЗМЫ ТРАНСПОРТА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ В КОМПОЗИТЕ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ, ПОДВЕРГНУТЫМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОТЖИГУ | 47 |
| <i>О.А.Троицкий</i> СПИНОВОЕ РАЗУПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛА КАК ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПОЛЕ СВЧ – ИЗЛУЧЕНИЯ..... | 50 |
| <i>М.А.Морозова, О.В.Матвеев, Ю.П.Шараевский</i> НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СВЯЗАННЫХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ | 53 |

| | |
|--|-----|
| <i>Е.Н. Бегинин, С.Е. Шешукова, А.В. Садовников</i> ОСОБЕННОСТИ МНОГОМОДОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ОДНОМЕРНОМ МАГНОННОМ КРИСТАЛЛЕ | 56 |
| <i>К.В. Бубликов, А.В. Садовников</i> ВЛИЯНИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРИТОВОГО ВОЛНОВОДА КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ | 59 |
| <i>Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев</i> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ В РЕЗОНАТОРЕ БЛИЖНЕПОЛЕВОГО СВЧ –МИКРОСКОПА..... | 61 |
| <i>А.В. Бычок, А.В. Зоренко, Я.Я. Кудрик, В.В.Шинкаренко</i> СУБГАРМОНИЧЕСКИЕ СМЕСИТЕЛИ НА ДИОДАХ ШОТТКИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН | 64 |
| <i>К.В. Бирюков, А.В. Садовников</i> РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЛАТЕРАЛЬНО СВЯЗАННЫХ ЖИГ-ВОЛНОВОДАХ КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ В ПРИСУТСТВИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА ... | 67 |
| 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА | 70 |
| <i>Д.А. Усанов</i> БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ СВЧ МИКРОСКОПИЯ..... | 70 |
| <i>Г.Г. Акчурун, А.Н. Якунин, Н.П. Абаньшин, Б.И. Горфинкель, Г.Г. Акчурун, мл.</i> ТУННЕЛЬНЫЙ ФОТОЭФФЕКТ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ..... | 76 |
| <i>Д.И.Биленко, В.В.Галушка, И.В.Галушка, Я.Д.Карсакова, Д.В.Терин</i> НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МЕТОДЫ МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ НАНОЧАСТИЦ..... | 79 |
| <i>Д.А. Усанов, Ан.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин, М.Ю. Калинин, Е.О. Кащавцев, Е.И. Астахов</i> ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ АВТОДИНЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ ПРИ МИКРО- И НАНОСМЕЩЕНИЯХ..... | 82 |
| <i>А.В.Крайский, В.А.Постников, Т.Т.Султанов, Т.В.Миронова, А.А.Крайский, М.А.Шевченко</i> ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ..... | 87 |
| <i>С.В.Стецюра, И.В.Маляр, Е.В.Попова</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ, СТРУКТУРИРОВАННОГО МЕТАЛЛОМ В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ..... | 91 |
| <i>А.И. Михайлов, С.А. Сергеев</i> УСТРОЙСТВА НА ВОЛНАХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КЛАСС УСТРОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ | 94 |
| <i>А.И. Михайлов, И.О. Кожевников, А.В. Митин</i> ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СВЕТ-ЧАСТОТА НА ОСНОВЕ ВЫСОКООМНОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ | 97 |
| <i>Д.А. Усанов, А.Э. Постельга</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ ПО СПЕКТРУ ОТРАЖЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР | 100 |
| <i>С.В.Стецюра, И.В.Маляр, А.В.Козловский, М.С.Буланов</i> СГЛАЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИНТЕРФЕЙСНОГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКИ ОПТИЧЕСКИМ ОБЛУЧЕНИЕМ ИЗ ОБЛАСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА | 103 |
| <i>Н.Ш. Гимадеев, В.Ф. Названов</i> ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ(ДВУХСЛОЙНЫХ) НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛ-И-АГРЕГАТ С ПЛАЗМОННЫМ РЕЗОНАНСОМ (КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)..... | 106 |
| <i>А.Г. Роках, М.И. Шишкин, М.Д. Матасов</i> О ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ В СРЕДНЕМ И ДАЛЬНЕМ ИК ДИАПАЗОНАХ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОГО РЕЗОНАНСА | 108 |

| | |
|---|------------|
| <i>П.Г. Сычев, В.Ф. Названов</i> СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУР МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК (J-АГРЕГАТ) НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНАХ (КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ) | 111 |
| <i>С.В. Стецюра, П.Г. Харитонова, И.Ю. Стецюра, М.С. Буланов</i> ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК СУЛЬФИДОВ КАДМИЯ И СВИНЦА..... | 113 |
| <i>И.В.Маляр, С.В.Стецюра</i> ОСВЕЩЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКИ КАК ФАКТОР ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ОБЛАСТЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ АДСОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЛЯ НАНО- И БИООБЪЕКТОВ | 116 |
| <i>А.В. Хохлов</i> О МЕХАНИЗМАХ ПРОВОДИМОСТИ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ДВУОКИСИ ТИТАНА | 119 |
| <i>Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Р.К. Яфаров</i> ПОЛУЧЕНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГРАФЕНОПОДОБНЫХ СВЕРХСТРУКТУР | 121 |
| <i>В.С. Мельникова, Д.В. Фатеев, В.В. Попов</i> ОПТИЧЕСКИ АКТИВНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ПЛАЗМОННАЯ МОДА В ЭКРАНИРОВАННОЙ ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ..... | 126 |
| <i>И.А.Горбачев, А.В.Ермаков, А.С.Чумаков, В.П.Ким, Е.Г.Глуховской</i> ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ РАСТВОРА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА МОРФОЛОГИЮ МОНОСЛОЕВ И ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ | 129 |
| <i>А.В.Ермаков, А.С.Чумаков, И.А.Горбачев, В.П.Ким, Г.Б.Хомутов, Е.Г.Глуховской</i> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОРГАНИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ | 132 |
| <i>А.В. Саченко, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, П.Н. Брунков, Ю.В. Жиляев, Р.В. Конакова, П.О.Сай, В.Н. Шеремет</i> МЕХАНИЗМ ТОКОПЕРЕНОСА В ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ К ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ТРИНИТРИДАМ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ДИСЛОКАЦИЙ..... | 137 |
| 4. МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ..... | 140 |
| <i>Г.Е. Бриль, А.В. Егорова, Д.Э. Постнов</i> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПРОЦЕСС СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ГИСТОНОВ | 140 |
| <i>Ю.А.Пирогов</i> МОЛЕКУЛЯРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ЛОКАЛЬНАЯ ЯМР СПЕКТРОСКОПИЯ В МРТ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ..... | 142 |
| <i>С.А.Дёмин, И.А.Русанова, О.Ю.Панищев</i> ФРАКТАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПАТОЛОГИЧЕСКОЙ МОЗГОВОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕТОВЫМИ СТИМУЛАМИ..... | 144 |
| <i>Т.И. Субботина, Е.И. Савин, Д.В. Иванов, А.А. Хадарцев</i> МОДУЛИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА АКТИВНОСТЬ СТЕВЛОВЫХ КЛЕТОК..... | 147 |
| <i>О.Н. Малинкина, В.И. Фомина, А.Б. Шиповская</i> ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ В ПЛОСКОПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ РАСТВОРОВ ХИТОЗАНА В ВОДНО-КИСЛОТНЫХ ФАРМАКОПЕЙНЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ..... | 150 |
| <i>Ю.М.Брумштейн, В.М.Сокольский, Е.В.Скляренко, Т.А. Жирнова, А.С.Федорец</i> ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ЛЕЧЕБНЫХ ЦЕЛЕЙ: СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССОВ, МЕТОДОВ И МЕХАНИЗМОВ ВОЗДЕЙСТВИЙ..... | 153 |
| <i>Д.К. Тучина, А.Н. Башкатов, Э.А. Генина, А.Б. Бучарская, Г.С. Терентюк, В.Д. Генин, М.В.Баско, Н.Г. Хлебцов, Б.Н. Хлебцов, В.В.Тучин</i> КИНЕТИКА НАГРЕВА ОПУХОЛЕЙ И ОКРУЖАЮЩИХ ТКАНЕЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ БЛИЖНЕГО ИК СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ПРИ ВВЕДЕНИИ В ТКАНЬ ЗОЛОТЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТЕРЖНЕЙ | 158 |
| <i>Е.Б.Букреева, А.А.Буланова, Ю.В. Кистенев, Д.А.Кузьмин, С.А.Тузииков, Е.Л.Юмов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИФИЧНОСТИ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ВЫДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА БОЛЬНЫХ БРОНХОЛЕГОЧНЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И ХЕМОМЕТРИКИ | 161 |

| | |
|---|------------|
| <i>И.Ю.Ермаков, Г.О.Мареев, Т.В.Данилова, А.О.Мантуров</i> ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ КЛЕТОК МЕРЦАТЕЛЬНОГО ЭПИТЕЛИЯ СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ ПОЛОСТИ НОСА | 164 |
| <i>Д.А.Усанов, А.Э.Постельга, А.А.Дорошенко</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ФОРМЕ КОЛЕБАНИЙ ПЛЕЧЕВОЙ АРТЕРИИ С ПОМОЩЬЮ РАДИОВОЛНОВОГО АВТОДИНА | 167 |
| <i>П.Ю.Рогов, В.Г.Беспалов</i> ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ БЕЗОПАСНЫЕ УРОВНИ ЭНЕРГИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ | 170 |
| <i>С.В.Агасиева, А.Г.Гудков, Ю.А.Иванов, С.А.Мешков, В.Ю.Синякин, В.Д.Шашурин</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ПАССИВНЫМИ МЕТКАМИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР В ИНВАЗИВНОЙ БИОСЕНСОРИКЕ..... | 172 |
| <i>Э. Б.Александрова</i> МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЕ РЕДКИХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ЗАБОЛЕВАНИЙ В МАЗКЕ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ | 173 |
| <i>А.Г.Гудков, В.Ю.Леушин, И.А.Сидоров</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОБСТВЕННЫХ РАДИОТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ С 3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ | 175 |
| <i>И.А.Шикунова, В.Н.Курлов, В.Б.Лощенов</i> ИНСТРУМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ПРОФИЛИРОВАННОГО САПФИРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРАПИИ ОПУХОЛЕЙ..... | 176 |
| <i>А.Д. Усанов, В.Г. Ребров, Д.Г. Верхов</i> УВЕЛИЧЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ОРГАНОМИНЕРАЛОВ ИЗ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА IN VITRO В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ МОЧЕВИНЫ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННЫХ ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ | 178 |
| <i>В.А. Иванов, Д.С. Сидоренко</i> ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕМЕНЕННОСТИ ПИЩЕВОЙ И ФАРМ-ПРОДУКЦИИ..... | 182 |
| <i>А.Ю. Потлов, С.Г. Проскурин, С.В. Фролов</i> ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЭКСПРЕСС РЕГИСТРАЦИИ ПОГЛОЩАЮЩИХ И РАССЕИВАЮЩИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ | 183 |
| <i>А.О.Морозов, О.А. Морозов, В.П. Требух, А.В. Прокопенко</i> ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ БАКТЕРИЦИДНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ ПРОДУКТОВ СВЧ-ЭНЕРГИЕЙ..... | 185 |
| <i>Н.О.Бессуднова, О.А.Шляпникова, Э.А.Генина, С.Б.Вениг</i> ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ КОМПОЗИТНЫХ РЕСТАВРАЦИЙ IN VIVO | 188 |
| <i>И.В.Запорожкова, Л.С. Элбакян</i> ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАСТМАСС, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ..... | 191 |
| <i>А.Н. Грибов, Г.П. Любунь, Н.О.Бессуднова, С.Б.Вениг</i> ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ШАРОВИДНОГО ГРАФИТА | 194 |
| <i>В.С. Аткин, Н.О. Бессуднова, С.Б. Вениг</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АТОМНО-СИЛОВОЙ И РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНФИЛЬТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ В МАТЕРИАЛ ДЕНТИНА | 197 |
| 5. ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ | 201 |
| <i>И.М. Моисеенко, М.Ю.Морозов, А. Р. Давоян, В.В. Попов</i> УСИЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН В ГРАФЕНЕ С ДИФФУЗИОННОЙ НАКАЧКОЙ..... | 201 |
| <i>К. В. Машинский, Д. В. Фатеев, В. В. Попов</i> ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПЛАЗМОНОВ В ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ МЕТОДОМ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ | 204 |
| <i>С.А. Алавердян, А.А. Довгань, С.Ю. Молчанов, А.П. Креницкий, В.П.Мещанов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДИАПАЗОНА 0,1-0,2 ТГц..... | 207 |

| | |
|--|-----|
| <i>С.А. Алавердян, А.А. Довгань, С.Ю. Молчанов, А.П. Креницкий, В.П. Мещанов</i> СЕТОЧНЫЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН | 211 |
| <i>В.А. Максименко, А.А. Короновский, В.В. Макаров, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, К.Н.Алексеев, А.Г. Баланов</i> УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ОМИЧЕСКИМ ЭМИТТЕРОМ..... | 215 |
| <i>В.В.Макаров, А.Е.Храмов, А.А.Короновский, В.А.Максименко, О.И.Москаленко, С.А.Куркин, К.Н.Алексеев, А.Г.Баланов</i> УСИЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ В РЕЖИМЕ ДОМЕННОГО ТРАНСПОРТА | 217 |
| <i>А.П. Рытик, Д.А. Усанов</i> ДИНАМИКА ЛИНИИ КИСЛОРОДА В СПЕКТРЕ ГАЗОВ- ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ БРИГГСА-РАУШЕРА | 219 |

ВВЕДЕНИЕ

Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысоко-частотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» посвящена 100-летию со дня рождения первого заведующего кафедрой физики твердого тела, профессора, доктора физико-математических наук Зинаиды Ивановны Кирьяшкиной.

Свою научную деятельность Зинаида Ивановна Кирьяшкиной начала под руководством В.П. Жузе – ближайшего сотрудника академика А.Ф. Иоффе. Была научным руководителем работ по созданию полупроводниковых СВЧ детекторов с рекордными на протяжении нескольких десятилетий характеристиками. С 1957 года стала руководителем проблемной лаборатории полупроводников. С 1951 – заведующая кафедрой физики твёрдого тела Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. С 1967 года – доктор физико-математических наук. Была председателем секции физики полупроводников и диэлектриков методического Совета Минвуза СССР. По её инициативе были впервые в СССР разработаны программы курсов по подготовке специалистов, обучающихся в университетах по специальности “Физика полупроводников и диэлектриков” (1979 г.). Дважды избиралась деканом физического факультета СГУ. Избиралась депутатом Совета Союза Верховного Совета СССР. В 1980 г. ей было присвоено звание “Заслуженный деятель науки РСФСР”. Награждена Орденом Ленина (1971), “Знак Почёта” (1961г.), многими медалями.

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.

Известные специалисты в области полупроводниковой, СВЧ, микро-, нано- и опто электроники 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.

1. ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ СВЧ ДИАПАЗОНА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР И НАНОКОМПОЗИТОВ

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: skripala_v@info.sgu.ru

В последнее время растет интерес к исследованиям нового класса периодических структур, называемых «фотонными кристаллами». Эти структуры состоят из периодически расположенных составляющих, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. В спектре пропускания такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. При наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла могут возникать узкие «окна» прозрачности [1]. В СВЧ-диапазоне одномерный фотонный кристалл может быть реализован как с помощью волноводов с диэлектрическим заполнением [2, 3], так и планарных линий передачи с периодически изменяющейся структурой [4–6].

Исследованию особенностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с фотонными структурами, содержащими включения в виде полупроводниковых и нанометровых металлических наноструктур и нанокomпозитов, решению обратной задачи – нахождению электропроводности, толщины, комплексной диэлектрической проницаемости включений в виде полупроводниковых и нанометровых металлических наноструктур и нанокomпозитов по результатам измерений спектров отражения и прохождения взаимодействующего с ними СВЧ – излучения и посвящена предлагаемая работа.

Одномерные СВЧ фотонные кристаллы представляют собой структуры с периодическими неоднородностями. При наличии дефекта в такой структуре, нарушающего периодичность, в фотонной запрещенной зоне может проявляться резонансная особенность [7], называемая примесной модой колеба-

ний. Роль такого дефекта могут выполнять полупроводниковые и нанометровые металлические наноструктуры и нанокомпозиты с искомыми параметрами. Для расчета коэффициентов отражения R и прохождения D электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру, полностью заполняющую волновод по поперечному сечению, с плоскостями слоёв, перпендикулярных направлению распространения излучения, использовалась матрица передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны [8].

Для нахождения искоемых параметров исследуемых образцов по частотным зависимостям коэффициентов прохождения $D(f)$ и отражения $R(f)$ был использован метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение искоемых параметров, при котором сумма квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений коэффициентов пропускания и отражения становится минимальной.

Практически важной задачей микро- и наноэлектроники является задача одновременного определения электропроводности и толщины тонкого сильно легированного полупроводникового слоя, сформированного на полупроводниковой подложке. Для одновременного определения электропроводности и толщины полупроводниковых слоев необходимо устранить неоднозначность при решении обратной задачи, основанной на использовании частотных зависимостей коэффициентов отражения $R(f)$ и прохождения $D(f)$ СВЧ-излучения, взаимодействующего с исследуемой структурой, при её введении в структуру фотонного кристалла.

С этой целью предлагается проводить измерения при различных положениях вводимого в структуру фотонного кристалла измеряемого полупроводникового слоя.

Первый способ заключается в проведении измерений при двух различных положениях измеряемой структуры внутри нарушенного слоя фотонного кристалла, длина которого при этом остается постоянной.

Второй способ заключается в проведении измерений при фиксированном положении измеряемой структуры внутри нарушенного центрального слоя фотонного кристалла, но при двух различных длинах нарушенного слоя фотонного кристалла.

С целью повышения разрешающей способности предлагаемого метода измерений моделировался одномерный волноводный фотонный кристалл, состоящий из одиннадцати слоев, в диапазоне частот 27–40 ГГц. Толщина измеряемого полупроводникового слоя при решении тестовых задач варьировалась в диапазоне от 100 нм до 10,0 мкм.

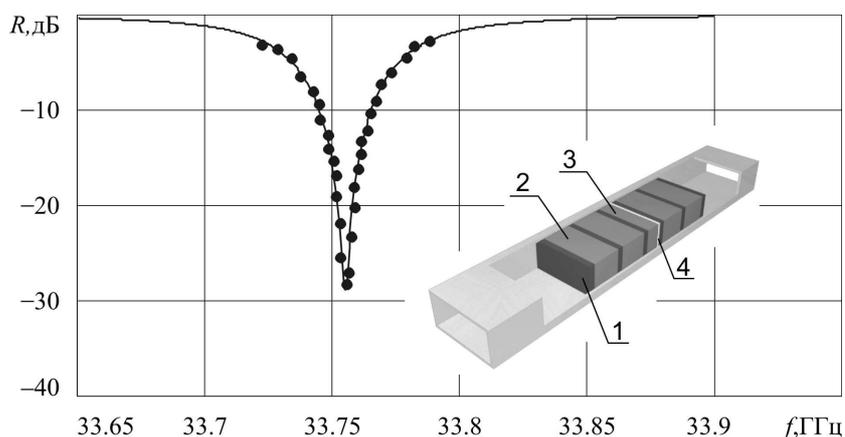


Рис. 1 Частотные зависимости тестовых (точки) и рассчитанных (линия) значений коэффициента отражения, полученные с использованием найденных значений параметров $t_{иск} = 105$ нм и электропроводностью $\sigma_{иск} = 1008 \text{ } \Omega^{-1}\text{м}^{-1}$. На вставке: одномерный волноводный фотонный кристалл: 1 – слой поликора, 2 – слой воздуха, 3 – нарушенный воздушный слой, 4 – полупроводниковый слой

На рис. 1 представлены частотные зависимости тестовых (точки) и рассчитанных (линия) значений коэффициента отражения, полученные с использованием искоемых значений толщины $t_{иск} = 105$ нм и электропроводности $\sigma_{иск} = 10,08 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ измеряемого полупроводникового слоя. Относительная погрешность определения толщины образца по тестовым данным составила $\pm 5 \%$, электропроводности $\pm 0,8 \%$.

Определение электрофизических свойств композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок по спектрам пропускания электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с микрополосковой фотонной структурой с исследуемым композитом основано на последовательном решении двух обратных задач. В результате решения первой обратной задачи по спектрам пропускания электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с микрополосковой фотонной структурой с исследуемым композитом, определяется комплексная диэлектрическая проницаемость композита, созданного на основе эпоксидного двухкомпонентного клея с различной объемной концентрацией включений в виде многослойных углеродных нанотрубок. В результате решения второй обратной задачи по зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композита от объемной доли входящих в состав композита углеродных нанотрубок определяется их диэлектрическая проницаемость и среднее значение удельной объемной электропроводности.

По спектрам пропускания электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с исследуемым образцом, определены комплексные диэлектрические проницаемости композитов, созданных на основе эпоксидного двухкомпонентного клея с различной объемной концентрацией включений в виде многослойных углеродных нанотрубок, подвергнутых воздействию ультрафиолетового излучения [9]. Исследовано влияние длительности воздействия ультрафиолетового излучения на среднее

значение удельной объёмной электропроводности нанотрубок в составе композитного материала в СВЧ-диапазоне (см. рис.2.).

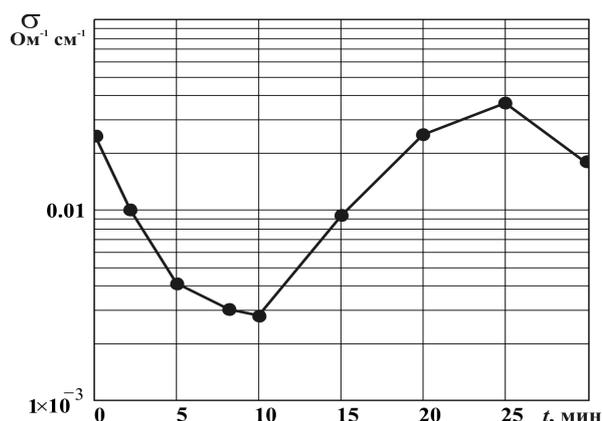


Рис. 2 Зависимость удельной электропроводности углеродных нанотрубок σ , входящих в состав композитного материала, от длительности воздействия УФ-излучения.

По спектрам пропускания и отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с микрополосковой фотонной структурой с исследуемым образцом, определена температурная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости углеродных нанотрубок, подвергнутых высокотемпературному отжигу, и композитных материалов, созданных на их основе.

Показано, что в зависимости от температуры отжига многослойных углеродных нанотрубок изменяются как среднее значение их удельной объёмной электропроводности в СВЧ-диапазоне, так и комплексная диэлектрическая проницаемость композитов с включениями в виде углеродных нанотрубок.

Установлено, что вследствие незначительности вклада свободных носителей заряда величина действительной части комплексной диэлектрической проницаемости многослойных углеродных нанотрубок, подвергнутых высокотемпературному отжигу, остается положительной и увеличивается примерно в два раза, достигая максимума при температуре отжига $\sim 350^\circ\text{C}$.

При этом величины мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости и удельной объёмной электропроводности входящих в состав композита многослойных углеродных нанотрубок, подвергнутых высокотемпературному отжигу, увеличиваются примерно в 5÷6 раз и достигают максимума при температуре отжига $\sim 450^\circ\text{C}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376), Правительства Российской Федерации (грант государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. *Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. et al.* Donor and acceptor modes in photonic band structure // *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 67. N. 24. P. 3380–3383.
2. *Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos N.G.* Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques.* 2001. Vol. 49. N 2. P. 297–306.
3. *Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Skvortsov V.S., Merdanov M.K.* Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // *Proc. of 37rd European Microwave Conference.* Munich, Germany. 8–12th October 2007. P. 198–201.
4. *Tae-Yeoul and Kai Chang.* Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* 2001. Vol. 49, N 3. P. 549–553.
5. *Гуляев Ю.В., Никитов С.А.* Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// *Радиотехника.* 2003. №8. С. 26–30.
6. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // *Радиотехника и электроника.* 2006. Т. 51. №6. С. 694–701.
7. *Yablonovitch E., Gmitter T. J., Meade R. D., Rappe A. M., Brommer K. D., and Joannopoulos J. D.* Donor and acceptor modes in photonic band structure // *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 67. N. 24. P. 3380–3383.
8. *Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Постельга А.Э., Пономарев Д.В.* Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов // *Доклады Академии Наук.* 2012. Т. 443. № 5. С.564-566.
9. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В.* Управление СВЧ-характеристиками композитных материалов с наполнителем из углеродных нанотрубок воздействием ультрафиолетового излучения // *Журнал технической физики.* 2013. Т. 83. №3. С. 91–95.
10. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В.* Влияние отжига на СВЧ-характеристики углеродных нанотрубок и нанокомпозитных материалов, созданных на их основе// *Журнал технической физики.* 2014. Т. 84. №6. С. 86–91.

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ

Г.А. Емельченко, В.М. Масалов, А.А. Жохов
Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка
E-mail: emelch@issp.ac.ru

Наука и технология фотонных кристаллов (ФК) начали активно развиваться с 1987 г. после публикаций работ Е. Yablonovitch и S. John [1,2], хотя первая теоретическая работа в этом направлении была выполнена еще 1972 г. В.П. Быковым [3]. Интересно провести параллель с открытием в том же 1987 г. высокотемпературной сверхпроводимости [4]. Темпы и ажиотаж вокруг исследований высокотемпературной сверхпроводимости маскировали открытие фотонных кристаллов, как принципиальный прорыв в дальнейшем развитии оптоэлектроники. К началу 21 века ажиотаж по ВТСП спал, благодаря

развитию нанотехнологий появились первые реализации концепции фотонной запрещенной зоны в оптическом диапазоне (1999 г) [5], и исследования фотонных кристаллов по своей актуальности и перспективности вышли на самый высокий уровень.

Опал в качестве фотонного кристалла впервые был исследован в ФТИ им. А.Ф.Иоффе в 1995-1996 гг. [6,7]. В этом сообщении представлены некоторые результаты исследований опалоподобных структур, полученные в ИФТТ РАН в последние годы [8]. Для экспериментального исследования структуры фотонных зон в опале была измерена дисперсия света в пленках фотонного кристалла опала. Тонкие пленки опала получены осаждением суспензии сферических частиц аморфного диоксида кремния на вертикальную кремниевую подложку при испарении растворителя. Структура фотонной зоны была восстановлена из измерений спектральной зависимости коэффициента преломления от частоты $n(\nu)$. Обнаружено изменение показателя преломления на границах фотонной запрещенной зоны. Волновой вектор перенормируется из-за взаимодействия световой волны с периодической структурой кристалла и соотношение между частотой и волновым вектором отклоняется от линейной зависимости.

Использование инвертированного опала существенно расширяет возможности модификации фотонных структур. Инвертированный опал представляет собой структуру, в которой пустоты заполнены органическим или неорганическим материалом и являются каркасом опалоподобной структуры, а SiO_2 микросферы отсутствуют. Каркасом опалоподобной структуры могут быть материалы с различными оптическими характеристиками. Пустоты занимают значительную часть кристалла, и таким образом их заполнение в большей степени может влиять на оптические свойства. Для приготовления инвертированного опала исходная решётка опала заполнялась эпоксидной смолой ЭД-20, после чего сферы диоксида кремния удаляли из композита опал-полимер травлением образцов в плавиковой кислоте. На рисунке 1(а) представлено СЭМ-изображение исходной опаловой матрицы, образованной сферами диоксида кремния диаметром $D = 255 \pm 10$ nm. На рисунке 1(б) и 1(с) соответственно – СЭМ-изображение композита «полимер ЭД-20 – опал» и инвертированного опала из полимера ЭД-20.

Получены опалоподобные фотонные кристаллы инвертированного опала, демонстрирующие смещение полосы селективного отражения, как в длинноволновую, так и в коротковолновую сторону относительно дифракционной полосы исходного опала из SiO_2 сфер. Определен вклад каркасов, образующих трехмерные периодические структуры, и наполнителей в спектральное положение дифракционных полос.

Экспериментально установлена «трёхуровневая, иерархическая» внутренняя структура субмикронных сферических частиц диоксида кремния, полученных методом гидролиза тетраэтоксисилана. Показано наличие центрального ядра и определён механизм формирования “третичных” частиц при ступенчатом их выращивании. Построена модель строения микрочастиц SiO_2 при многоступенчатом методе синтеза в форме ядра с концентрически-

ми оболочками из вторичных частиц, заканчивающимися плотными слоями первичных частиц. Показано, что нанопоры частиц доступны для воды (кинетический диаметр 0.264 нм) и недоступны для крупномолекулярных жидкостей.

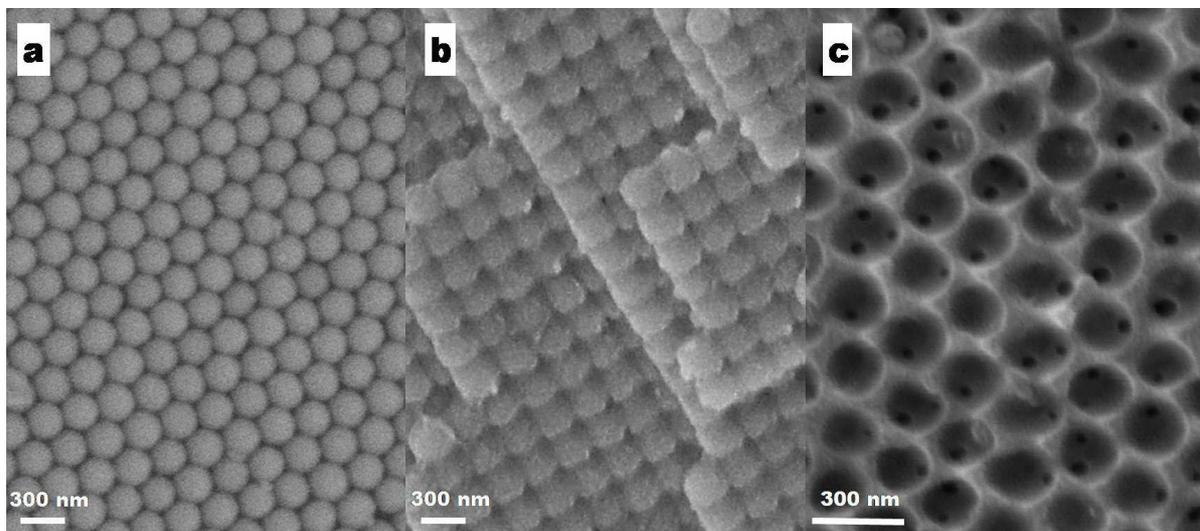


Рис. 1 СЭМ-изображение исходной опаловой матрицы, образованной сферами диоксида кремния диаметром $D = 255 \pm 10$ нм (a) (ориентация поверхности (111)), излом композита полимер ЭД-20-опал с ориентацией (100) (b), и инвертированного опала из полимера ЭД-20 (c) (ориентация поверхности (111)).

Достигнута генерация стимулированного излучения двумерным фотонным кристаллом на основе наноструктуры оксид цинка – опал в УФ- области спектра с использованием опаловой структуры в качестве распределенной Брэгговской решетки (РОС-лазер). При оптическом возбуждении порог генерации при комнатной температуре составил величину меньше 300 кВт/см^2 . Этот порог меньше на два порядка, чем порог для планарной структуры ZnO-SiO_2 , благодаря резонансу в 2М структуре с распределенной обратной связью ZnO –опал.

Реализована идея сохранения периодической структуры опаловой матрицы при термообработках путем введения в поры опала стабилизирующей фазы, не реагирующей с диоксидом кремния в условиях отжига, и получен массивный фотонный кристалл в форме монолитного прозрачного диоксида кремния с упорядоченным распределением оксида циркония, который образует трехмерную периодическую решетку нанокластеров по всему объему образца.

Синтезированы углеродные нанокомпозиты со структурой инвертированного опала, которые демонстрируют высокопористую периодическую структуру, представляющую собой трехмерную реплику пустот исходной опаловой решетки. Такие структуры перспективны для использования в ионисторах, катализаторах, сенсорах.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-02-00777 и 12-02-33124-мол_а_вед.

Библиографический список

1. *S.John*, Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices//Phys. Rev. Lett. 58(1987)2486-2489
2. *E.Yablonovitch*. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics//Phys. Rev. Lett. 58(1987)2059-2062
3. *Быков В.П.* Спонтанное излучение в периодической структуре // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. С. 505–513.
4. *Bednorz, J., and K. A. Müller*// Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system 1986, Z. Phys. B 64, 189.
5. *J.G.Fleming, S.Y.Lin*// Three-dimensional photonic crystal with a stop band from 1.35 to 1.95 μm, Optics Letters 24(1)(1999)49-51
6. *Astratov V.N., Bogomolov V.N., Kaplyanskii A.A., Prokofiev A.V., Samoilovich L.A., Samoilovich S.M., Vlasov Yu.A.* Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: Quantum confinement and photonic band gap effects. // II Nuovo Cimento – 1995. – V.17D – Is.11-12 – P.1349-1354.
7. *Богомолов В.Н., Курдюков Д.А., Прокофьев А.В., Самойлович С.М.* Эффект фотонной запрещённой зоны в оптическом диапазоне на твёрдотельных SiO₂ кластерных решётках – опалах // Письма в ЖЭТФ – 1996. – Т.63 – в.7 – С.496-501.
8. *Грузинцев, А.Н., Емельченко, Г.А., Ермолаева, Ю.В., Масалов, В.М., Матвеевская, Н.А., Толмачев, А.В.* Материалы для нанофотоники: формирование и свойства наночастиц и наноструктур. – Харьков: Институт монокристаллов, 2010. – с.400.

НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА

*Д.А.Усанов, С.А.Никитов, А.В.Скрипаль,
В.Н.Посадский, В.С.Тяжлов, А.В.Байкин*

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: usanovda@info.sgu.ru, skripala_v@info.sgu.ru

Представляет научный и практический интерес создание многоэлементных СВЧ фотонных кристаллов, характеризующихся малыми размерами. Для решения такого рода задачи можно в качестве фотонного кристалла использовать структуры, возбуждающие волны высших типов, длины волн которых существенно меньше длины волны в волноводе основного типа. Были исследованы волноводные фотонные кристаллы, представляющие собой структуры из последовательно чередующихся диэлектрических слоёв — чётные элементы фотонного кристалла, и тонких металлических пластин, частично перекрывающих сечение волновода — нечётные элементы фотонного кристалла.

Между пластинами и широкими стенками волновода имелись зазоры. Каждая из пластин создавала одинаковый по ширине зазор по всей длине пластины. При этом зазоры между нечётными металлическими пластинами и волноводом создавались у одной из широких стенок волновода, а зазоры между чётными металлическими пластинами и волноводом – у противоположной широкой стенки волновода.

В данном случае зазор является источником волн высших типов [1], длины волн которых существенно меньше длины волны в волноводе основного типа. Структура исследуемого низкоразмерного волноводного СВЧ фотонного кристалла изображена на рис. 1.

В качестве материала диэлектрика использовались: пенополистирол ($\epsilon = 1,02$) и фторопласт ($\epsilon = 2,1$). Слои диэлектрика полностью заполняли поперечное сечение (23×10 мм) волновода. Металлические пластины толщиной 50 мкм были выполнены из алюминия. Ширина зазора S не превышала одной десятой части размера узкой стенки волновода.

На основе численного моделирования в САПР Ansoft HFSS исследовалось влияние толщины диэлектрических слоев, ширины зазоров и количества слоев структуры ФК на амплитудно–частотные характеристики (АЧХ) коэффициентов пропускания и отражения фотонного кристалла. Экспериментальное исследование фотонных кристаллов, созданных в соответствии с описанной выше моделью, проводилось с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A.

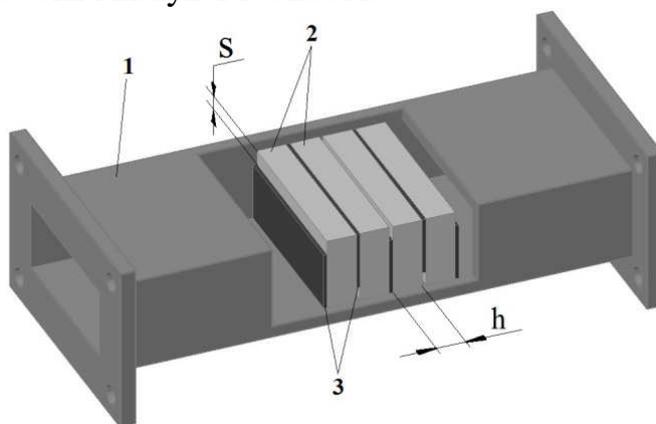


Рис. 1. Модель фотонного кристалла: 1 – отрезок прямоугольного волновода, 2 – слои диэлектрика, 3 – тонкие металлические пластины, S – ширина зазора, h – толщина слоя диэлектрика

Результаты численного моделирования и экспериментального исследования фотонных кристаллов представлены на рис.2 и 3.

Из полученных результатов следует, что амплитудно–частотная характеристика коэффициента пропускания S_{12} исследуемой структуры состоит из характерных чередующихся «запрещенных» и «разрешенных» зон, образованных совокупностью резонансных пиков. Количество резонансных пиков становится равным $m-1$, при количестве металлических пластин в структуре ФК равном m . Уменьшение толщины диэлектрических слоев структуры h , так же как и увеличение ширины зазора S , приводит к смещению АЧХ ФК в сторону более коротких длин волн и к увеличению ширины «разрешенной» зоны. При этом ширина и глубина «запрещенной» зоны уменьшается.

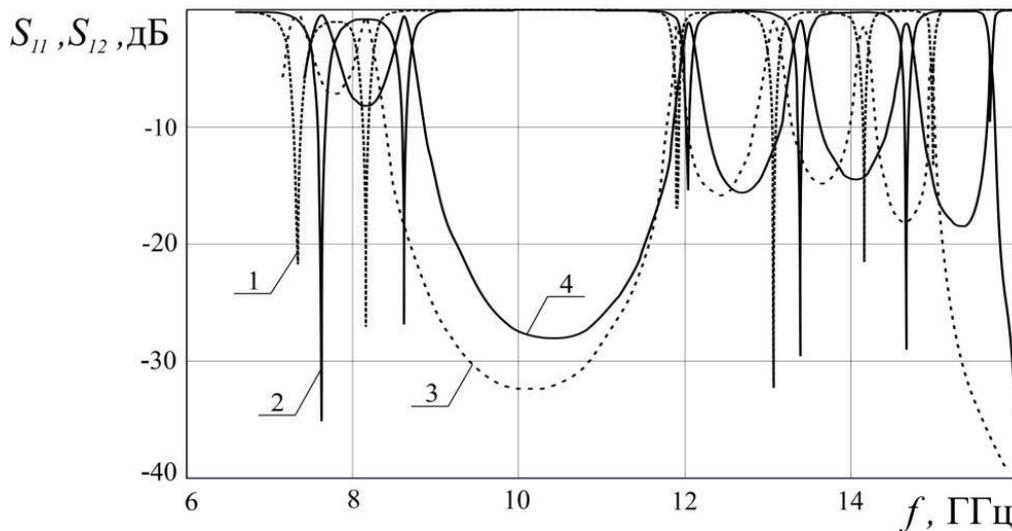


Рис. 2. Расчетные АЧХ коэффициентов пропускания и отражения девятислойного фотонного кристалла, содержащего металлические пластины с шириной зазора $S = 1$ мм, при различных толщинах диэлектрических слоев h (фторопласт, $\epsilon = 2,1$). Кривые 1 и 3 – коэффициенты отражения S_{11} и пропускания S_{12} соответственно, при толщине слоев фторопласта $h = 3,5$ мм. Кривые 2 и 4 – коэффициенты отражения S_{11} и пропускания S_{12} соответственно, при толщине слоев фторопласта $h = 3$ мм.

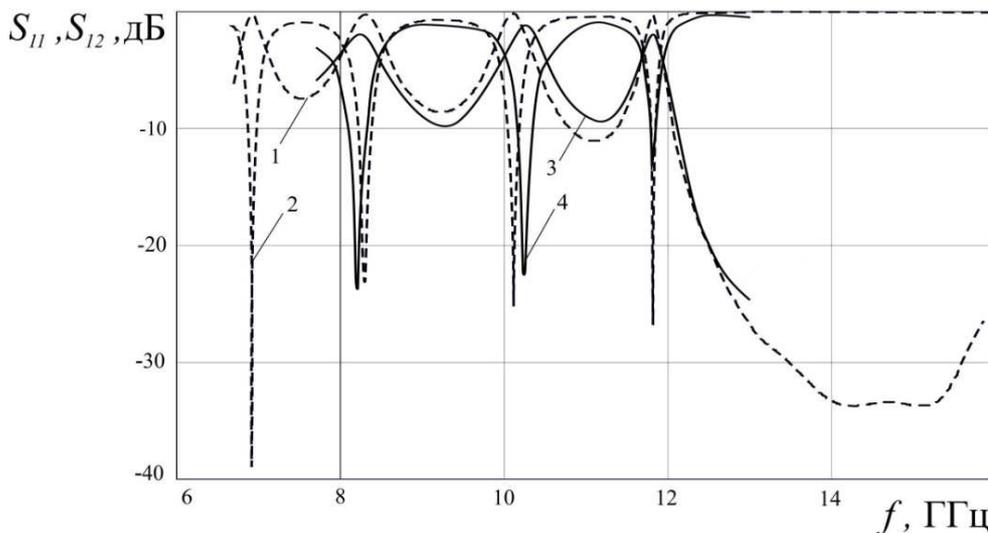


Рис. 3. Расчетные (штриховые кривые) и экспериментальные (сплошные кривые) АЧХ коэффициентов отражения S_{11} и пропускания S_{12} девятислойного ФК, содержащего диэлектрические слои из пенополистирола ($\epsilon = 1,02$) толщиной $h = 3$ мм, чередующиеся с металлическими пластинами с зазорами шириной $S = 1$ мм. Кривые 1 и 2 – расчетные коэффициенты пропускания S_{12} и отражения S_{11} соответственно, кривые 3 и 4 – экспериментальные коэффициенты пропускания S_{12} и отражения S_{11} соответственно

Продольный размер предложенного волноводного фотонного кристалла составил 12,25 мм.

Таким образом, показана возможность создания волноводного СВЧ фотонного кристалла с уменьшенными продольными размерами. В результате численного моделирования и экспериментального исследования амплитудно–частотных характеристик выявлен зонный характер коэффициентов пропускания и отражения предложенного типа фотонного кристалла. Применение металлических пластин с зазорами в структуре фотонного кристалла

позволило существенно уменьшить его продольный размер по сравнению с фотонными кристаллами, созданными на элементах, выполненных из чередующихся слоёв диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью. Продольный размер предложенного волноводного СВЧ фотонного кристалла составил 12,25 мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030), предприятия ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон».

Библиографический список

1. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансное пропускание волны в прямоугольном волноводе, содержащем близкорасположенные диафрагмы с неперекрывающимися отверстиями // Радиотехника и электроника. 2004. Том. 49. № 4. С. 458–459.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОПАЛОПОДОБНЫХ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Е.А. Бондаренко, С.А. Бондаренко¹, Л.В. Михнев, Д.С. Вакалов, Д.П. Валухов, Е.О. Плеханова, А.В. Пацай

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

¹Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, г. Москва

E-mail:johnbond@yandex.ru

В настоящее время в науке и технике значительное внимание уделяется методам формирования и исследованию свойств фотонно-кристаллических структур. Периодичность структуры фотонных кристаллов (ФК) определяет их основное свойство: наличие отражения в спектральном диапазоне, сравнимом с периодом их структуры, вследствие брэгговской дифракции на границах раздела фазовых пространств (областей, отличающихся величиной показателя преломления). В результате в определенном диапазоне спектра возникает фотонная стоп-зона (ФСЗ), запрещающая распространение излучения в направлении, перпендикулярном периодическим плоскостям структуры.

С точки зрения простоты изготовления наиболее перспективно использование опалоподобных фотонных кристаллов (коллоидные ФК), которые представляют собой трехмерные структуры, состоящие из монодисперсных микросфер диоксида кремния или полистирола, плотноупакованных в гранцентрированную кубическую (ГЦК) решетку. В таких ФК спектры отражения сформированы главным максимумом (брегговское отражение от семейства плоскостей (111) ГЦК структуры плотноупакованных микросфер) и мелкими интерференционными, которые наблюдаются лишь в достаточно тонких слоях и пленках. Положение, величина и полуширина брегговского максимума отражения зависят от диаметра микросфер и показателя прелом-

ления составляющего их материала. При использовании концепции структур на основе коллоидных ФК открываются перспективы разработки отражающих покрытий для оптической и оптоэлектронной техники, отличающиеся от своих аналогов возможностью выбора необходимого спектрального диапазона.

Для расширения функциональных возможностей отражающих покрытий на основе опалоподобных материалов перспективным является разработка структур, состоящих из чередующихся пленок, каждая из которых сформирована плотноупакованными монодисперсными микросферами определенного диаметра (ФК гетероструктуры). Спектральные параметры ФСЗ в этом случае можно изменять, варьируя размеры сфер, составляющих отдельные пленки, а также порядком их чередования и толщиной.

Настоящая работа посвящена исследованию оптических свойств двухслойных опалоподобных ФК гетероструктур на основе микросфер полистирола.

Фотонно-кристаллические гетероструктуры получали методом осаждения микросфер полистирола на стеклянные подложки под действием капиллярных сил, который предполагает рост пленки по мере движения мениска на границе раствор-подложка. Полученные структуры сушили, после чего проводилось исследование их спектров отражения. Регистрацию спектров проводили на автоматизированном измерительном комплексе, разработанном в СКФУ. Стоит отметить, что для определенности были выбраны гетероструктуры, составленные из пленок одинаковой толщины.

Как показали результаты оптических исследований у ФК гетероструктур с толщинами пленок более 10 мкм на спектре отражения наблюдаются два максимума, положение которых совпадает с ФСЗ отдельных слоев. Относительный вклад их в общий спектр зависит от степени перекрытия спектральных рефлексов, составляющих структуру пленок.

Оптические исследования ФК гетероструктур с толщиной отдельных слоев менее 10 мкм показали, что на спектрах отражения наблюдаются три максимума. Их спектральное положение зависит от толщины слоев. По-видимому, причиной модификации формы спектрального распределения отражения, являются процессы отражения излучения от границы раздела между пленками.

Подобное предположение можно сделать исходя из сравнительного анализа оптических свойств ФК гетероструктур и двухслойных оптически прозрачных диэлектрических покрытий. Существенное отличие фотонно-кристаллических гетероструктур от многослойных пленочных диэлектрических покрытий заключается в механизмах отражения между границами раздела пленок. Так на границе раздела тонкопленочных диэлектрических структур отражение происходит в результате разницы показателей преломления слоев. В то же время макроскопические оптические свойства опалоподобных пленок, составленных из микросфер различного диаметра, идентичны, так как в любом случае они образованы полистиролом с практически одинаковой пористостью. Поэтому единственной причиной модификации

спектрального распределения отражения могут являться интерференционные эффекты в результате брэгговского отражения излучения от семейства плоскостей (111) нижнего слоя.

Таким образом, в тонкопленочных ФК гетероструктурах происходит модуляция электромагнитных колебаний не только в отдельных слоях, но и между ними, что позволяет регулировать как форму, так и ширину спектрального распределения отражения, что расширяет перспективы использования подобных структур в оптике и оптоэлектронике.

Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания по проекту №2014/216.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ ВОЛНОВОДНАЯ СТРУКТУРА С РАЗРЕШЕННЫМИ И ЗАПРЕЩЕННЫМИ ЗОНАМИ

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.П. Фролов, В.Е. Орлов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: usanovda@info.sgu.ru, skripala_v@info.sgu.ru

Введение

Среди новых типов твердотельных структур, применяемых в технике СВЧ, можно выделить периодические структуры, получившие название фотонных кристаллов [1–5]. Представляет интерес создание волноводного устройства кольцевого типа с неоднородностью, обладающего свойствами фотонного кристалла. Для этого предлагается использовать волноводную линию передачи, содержащую диафрагму и систему рамочных элементов (рис. 1), механизм взаимодействия СВЧ-излучения с которыми рассмотрен, в частности, в работах [6, 7]. Наибольшее практическое значение такого рода конструкция может представлять для коротковолновой части СВЧ-диапазона.

Модель волноводной структуры на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов

В отрезке волновода сечением 23 мм×10 мм, перпендикулярно направлению распространения электромагнитного излучения, расположена металлическая диафрагма толщиной 0.3 мм. Через отверстие (диаметром 3.5 мм) в диафрагме проходит рамочный элемент, изготовленный из медной проволоки диаметром 1 мм, обеспечивающий в определённом диапазоне частот передачу электромагнитного излучения из «одного» плеча волноведущей системы в «другое» и наоборот. Размеры рамок определяют диапазоны частот разрешённых и запрещённых для передачи электромагнитного излучения через диафрагму.

Для создания в запрещённой (разрешённой) зоне исследуемой системы резонансной особенности в виде окна прозрачности (окна запираения) вводится неоднородность типа «штырь с зазором». Количество и геометрические размеры (такие как диаметр и высота штыря) неоднородностей определяют

электродинамические характеристики исследуемой системы.

Результаты экспериментального исследования СВЧ-элемента на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов

Экспериментально были реализованы конструкции, основанные на результатах компьютерного моделирования и обеспечивающие:

- возникновение запрещенной зоны в диапазоне частот 8.8–10.2 ГГц;
- возникновение разрешенной зоны в диапазоне частот 8.67–11.12 ГГц.

Волноводная структура на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, характеризующаяся наличием запрещенной зоны

Экспериментально исследовалась система из двух связанных рамочных элементов длиной 21 мм каждый, содержащая неоднородность типа «штырь с зазором». Первый штырь с зазором располагался на расстоянии 10 мм слева от плоскости диафрагмы, второй – на расстоянии 7 мм справа от плоскости диафрагмы, третий – на расстоянии 14 мм справа от плоскости диафрагмы. Полупроводниковая $n-i-p-i-n$ -структура механически зажималась между контактными площадками третьего штыря и рамочного элемента. Подключение источника питания к $n-i-p-i-n$ -структуре осуществлялось с помощью тонкого проволочного вывода через отверстие в узкой стенке волновода.

На рис. 1 представлены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения вблизи пика пропускания запрещенной зоны СВЧ-элемента для такой конструкции.

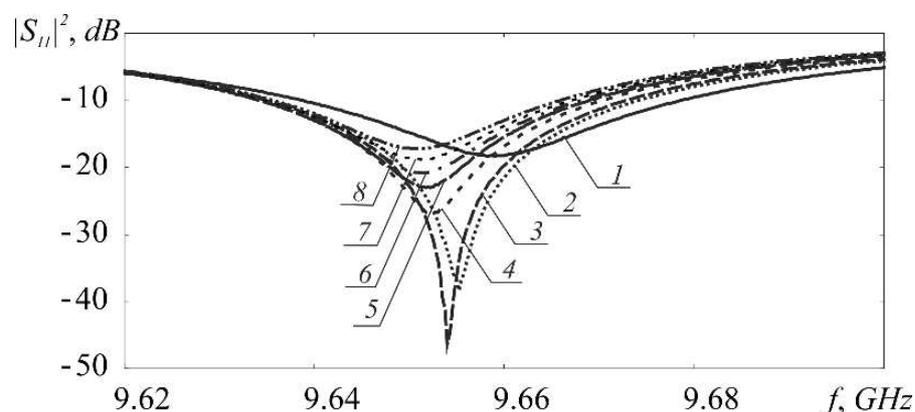


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения для различных значений протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока: 1– $I=0$ мА; 2– $I=20$ мА; 3– $I=30$ мА; 4– $I=40$ мА; 5– $I=60$ мА; 6– $I=80$ мА; 7– $I=140$ мА; 8– $I=320$ мА

Таким образом, полученные экспериментальные зависимости показывают возможность эффективного управления характеристиками резонансной особенности, в запрещенной зоне исследуемой структуры с использованием $n-i-p-i-n$ -структуры.

Волноводная структура на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, характеризующаяся наличием разрешенной зоны

Экспериментально исследовалась система из двух связанных рамочных элементов длиной 30 мм каждый.

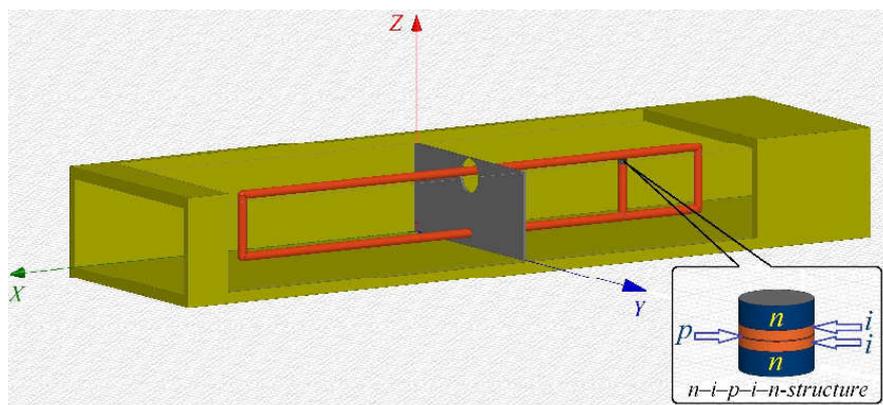


Рис. 2. Конструкция СВЧ-элемента на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, с неоднородностью типа «штырь с зазором и полупроводниковой $n-i-p-i-n$ -структурой, расположенный в зазоре между штырем и рамочным элементом

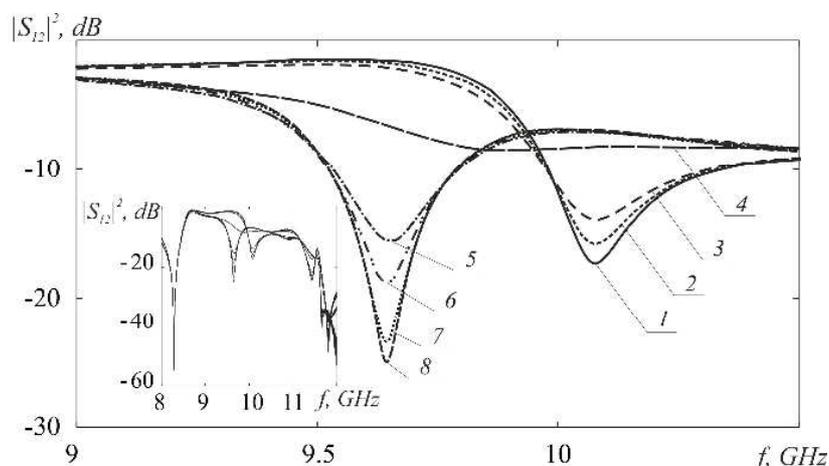


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики коэффициента прохождения: 1– $I=0$ мА; 2– $I=1$ мА; 3– $I=3$ мА; 4– $I=10$ мА; 5– $I=40$ мА; 6– $I=60$ мА; 7– $I=190$ мА; 8– $I=300$ мА

Неоднородность типа «штырь с зазором» с электрически управляемым элементом в виде полупроводниковой $n-i-p-i-n$ -структуры, размещенным в зазоре между рамочным элементом и штырем, располагалась на расстоянии 20 мм справа от плоскости диафрагмы (см. рис. 2).

На рис. 3 представлены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики коэффициента прохождения вблизи пика запирающей разрешенной зоны исследуемого СВЧ-элемента для различных значений тока, протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру.

Заключение

Таким образом, показана возможность создания волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания, на основе диафрагмы и рамочных элементов, помещенных в волноведущую секцию. Показано, что введение в конструкцию неоднородностей типа «штырь с зазором» обеспечивает создание в запрещенной частотной зоне резонансной особенности типа окна прозрачности, а в разрешенной зоне резонансной особенности типа пика заграждения.

Величина динамического диапазона регулировки коэффициента пропускания в резонансной особенности, с помощью введенной $n-i-p-i-n$ -структуры, достигает 23.5 дБ при уровне потерь пропускания 1.5.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. *Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M.* Microwave applications of photonic crystals // Progress in Electromagnetics Research. 2003. V. 41. P. 185–209.
2. *Gomez A., Vegas A., Solano M.A. & Lakhtakia A.* On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies // Electromagnetics. 2005. V. 25. Issue 5. P. 437–460.
3. *Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G.* Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2001. V.49. №2., P. 297–306.
4. *Tae-Yeoul and Kai Chang,* Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. V. 49, №3, P.549–553.
5. *Гуляев Ю.В., Никитов С.А.* Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации // Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30.
6. *Усанов Д.А., Орлов В.Е., Безменов А.А.* Рамочные элементы связи в волноводе // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1977. Т.1. № 3. С. 37- 41.
7. *Усанов Д.А., Орлов В.Е.* Использование рамочной связи в полупроводниковых устройствах для управления СВЧ мощностью // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1975. №1. С. 35-37.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПРЕЩЕННЫХ ЗОН В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

М.А.Морозова, А.Ю. Шараевская

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: upark@inbox.ru, maluginama@yandex.ru

В последнее время большой интерес вызывает получение кристаллов, подобных фотонным [1], на основе магнитных плёнок – магнонных кристаллов (МК) [2-3], в которых распространяющимися волнами являются спиновые волны (магноны). МК имеют определенные преимущества по сравнению с фотонными кристаллами: возможно управление свойствами магнонных кристаллов внешним магнитным полем; в частности, магнонной запрещенной зоной, можно создавать кристаллы в диапазоне СВЧ размером порядка нескольких миллиметров, использование планарной технологии и др.. Интерес к периодическим структурам на основе ферромагнитных пленок связан с тем, что такие планарные структуры представляют интерес для разработки перестраиваемых магнитным полем устройств обработки информации в СВЧ диапазоне [3].

Настоящая работа посвящена исследованию механизмов формирования брэгговских запрещенных зон в ферромагнитных периодических

структурах, представляющих собой два связанных одномерных МК и структуру типа МК-ферритовая пленка, при возбуждении в них магнитоэлектрических волн (МЭВ). Важной особенностью связанных структур является возбуждение на одной частоте двух нормальных мод - быстрой и медленной волн с различными групповыми и фазовыми скоростями. Впервые механизм формирования запрещенных зон в периодической структуре, представляющей собой два связанных одномерных МК с одинаковыми параметрами, рассмотрен авторами в [4].

На основе метода связанных волн для рассматриваемых структур построена общая модель в виде системы алгебраических уравнений для огибающих прямых и встречных волн, которая имеет вид:

$$\begin{cases} (-\omega^2 + \omega_H^2 + \beta k_0)A_{1,2} + \beta k_0 K A_{2,1} + \beta \frac{\delta d_{1,2}}{2} \frac{k_{-1}^2}{k_0} (B_{1,2} + K B_{2,1}) = 0 \\ (-\omega^2 + \omega_H^2 + \beta k_{-1})B_{1,2} + \beta k_{-1} K B_{2,1} + \beta \frac{\delta d_{1,2}}{2} \frac{k_0^2}{k_{-1}} (A_{1,2} + K A_{2,1}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $A_{1,2}, B_{1,2}$ - амплитуды прямых и встречных волн МЭВ; $\beta = \frac{\omega_M \omega_H d_0}{2}$ [4], K - электродинамический параметр, определяющий связь между магнетонными кристаллами, $\delta d_{1,2}$ - параметры, характеризующие геометрические размеры периодических структур 1 и 2, соответственно. Используя в (1) условие Брэгга $k_0 + k_{-1} = \frac{2\pi}{L}$ и приравнявая детерминант системы (1) к нулю, получим дисперсионное уравнение $\omega = \omega(k)$ для связанных периодических структур с разными геометрическими параметрами. Результаты расчетов дисперсионных характеристик, постоянных затухания в области запрещенных зон и ширины запрещенных зон представлены на рис.1,2.

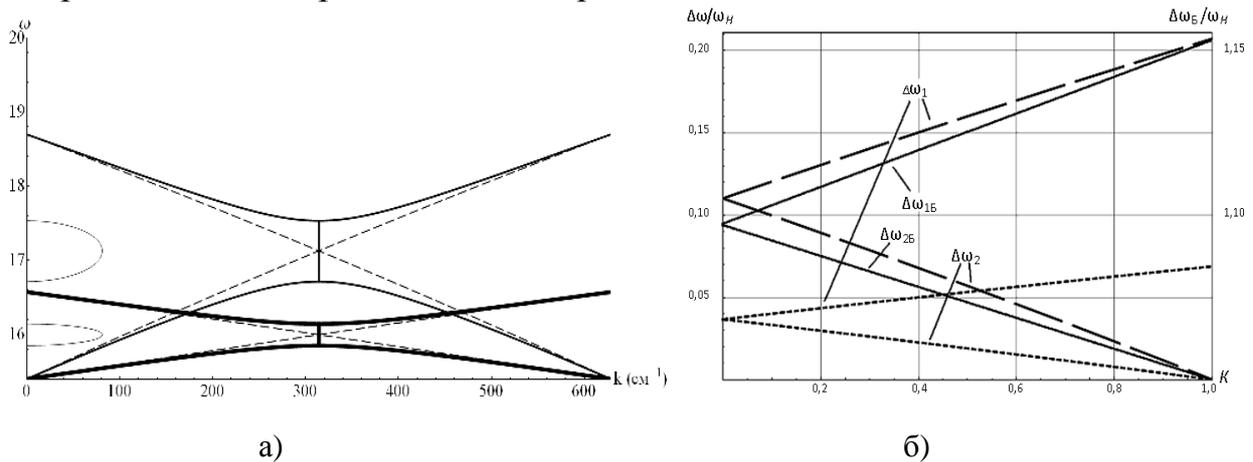


Рис. 1. Дисперсионные характеристики (а) и зависимости запрещенных зон (б) от параметров структуры МК-МК: а) - дисперсионные характеристики для быстрой (тонкие кривые) и для медленной (толстые кривые) волн при $\delta d_{1,2}=0.5$, $K=0.5$; б) - ширины запрещенных зон ($\Delta\omega_1$ - для быстрой волны, $\Delta\omega_2$ - для медленной волны) от параметра K при $\delta d = 0.5$ (пунктирные прямые с короткими штрихами) и $\delta d = 1.5$ (с длинными штрихами). Сплошными линиями показаны зависимости центральных частот запрещенных зон ($\Delta\omega_{B1}$ - для быстрой волны, $\Delta\omega_{B2}$ - для медленной) от параметра K

В случае связанных однородных плёнок ($\delta d_{1,2}=0$) связь приводит к тому, что дисперсионная кривая, соответствующая одиночной однородной плёнке, расщепляется на две, соответствующие быстрой и медленной волнам - нормальным модам связанной структуры (пунктирные кривые на рис. 1а и 2а). На частотах фазового синхронизма взаимодействие быстрой прямой и быстрой встречной волн, а также медленной прямой и медленной встречной волн приводит к формированию двух запрещенных зон (сплошные кривые на рис.1а). причем параметры запрещенных зон (рис.1б) линейно зависят от связи. Для случая связанной структуры в виде МК-пленка формируются три запрещенные зоны (рис. 2а). Аналогичный результат получается и для структуры МК-МК с разными геометрическими параметрами, что обусловлено несимметричностью структур. Из результатов, представленных на рис.2б, видно, что ширина дополнительной зоны $\Delta\omega_3$ увеличивается с ростом параметра несимметричности и уменьшается с ростом коэффициента связи.

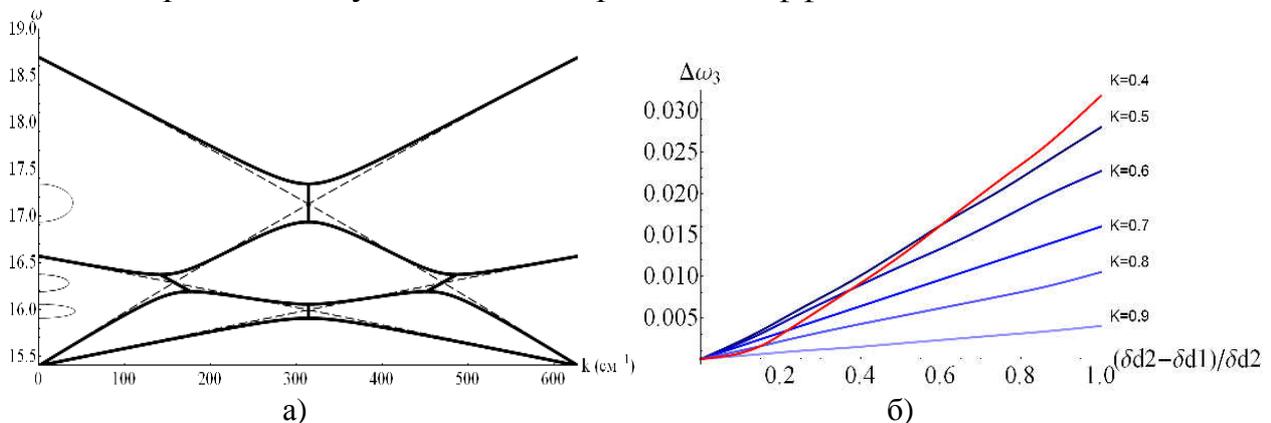


Рис2. Дисперсионные характеристики (а) при $\delta d_1=0$, $\delta d_2=0.5$, $K=0.5$ и зависимости дополнительной ширины дополнительной запрещенной зоны $\Delta\omega_3$ (б) от параметров структуры МК-Пленка

Таким образом, на основе результатов численного моделирования показана возможность эффективного управления характеристиками запрещенных зон в связанных периодических ферромагнитных структурах.

Работа выполнена при поддержке грантов Правительства РФ (ГК № 11.G34.31.0030) и РФФИ (№ 140700273) и в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (№ НШ-828.2014.2).

Библиографический список

1. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. // М.:Физматлит. 2005. С.648. – ISBN 5-9221-0584-1.
2. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В. и др. Ферромагнитные пленки с периодическими структурами с магнойной запрещенной зоной - магнотонные кристаллы // Письма в ЖЭТФ. 2003.Т.77. №10. С. 670-674.
3. A A Serga, A V Chumak and B Hillebrands B. YIG magnonics //J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. Art.№264002.
4. Морозова М. А., Шараевская А. Ю. Дисперсионные характеристики магнотостатических волн в связанных магнотонных кристаллах // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2013. Вып. 15. С. 82–93.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЁВ

Д.А. Усанов, С.А. Никитов¹, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, Е.В. Латышева

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

¹Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Для определения толщины и электропроводности полупроводникового слоя с использованием частотных зависимостей коэффициентов прохождения и отражения СВЧ-излучения, взаимодействующего с исследуемой структурой, при её введении в центральный нарушенный слой фотонного кристалла, предлагается два способа.

Первый способ заключается в проведении измерений при двух различных положениях измеряемой структуры внутри нарушенного слоя фотонного кристалла, длина которого при этом остается постоянной. Второй способ заключается в проведении измерений при фиксированном положении измеряемой полупроводниковой структуры внутри нарушенного центрального слоя фотонного кристалла, но при двух различных длинах нарушенного слоя фотонного кристалла [1].

Для нахождения толщины t и электропроводности σ сильнолегированного полупроводникового слоя по частотным зависимостям $D(f)$ и $R(f)$ используется метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такие значения параметров, при которых сумма $S(t, \sigma)$ квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений коэффициентов пропускания и отражения, измеренных при двух различных положениях измеряемой структуры (при двух различных значениях длины центрального нарушенного слоя фотонного кристалла)

$$S(t, \sigma) = \sum \left((D_1(f, t, \sigma) - D_{1эксп}) + (R_1(f, t, \sigma) - R_{1эксп}) + \right. \\ \left. + (D_2(f, t, \sigma) - D_{2эксп}) + (R_2(f, t, \sigma) - R_{2эксп}) \right)^2$$

становится минимальной.

Здесь $D_{1эксп}$, $D_{2эксп}$, $R_{1эксп}$, $R_{2эксп}$ – измеренные, а $D_1(f, t, \sigma)$, $D_2(f, t, \sigma)$, $R_1(f, t, \sigma)$, $R_2(f, t, \sigma)$ – рассчитанные частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения электромагнитной волны, падающей со стороны фотонного кристалла, при двух различных положениях измеряемой структуры внутри нарушенного слоя фотонного кристалла (при двух различных значениях длины центрального нарушенного слоя фотонного кристалла).

Искомые значения толщины t и электропроводности σ исследуемого образца определяются численным методом в результате решения системы уравнений:

$$\frac{\partial S(t, \sigma)}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{\partial S(t, \sigma)}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

В экспериментах рассматривался одномерный волноводный фотонный кристалл, состоящий из одиннадцати слоев в диапазоне частот 8–12 ГГц. Не-

четные слои выполнены из поликора (Al_2O_3 , $\epsilon = 9,6$), четные – из фторопласта ($\epsilon = 2$). Длина нечетных отрезков – 1 мм, четных – 7 мм. Нарушение создавалось посредством изменения длины центрального шестого слоя (фторопласт), что приводило к появлению «окна» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла.

Измерения проводились при двух различных длинах нарушенного слоя фотонного кристалла. Длина нарушенного шестого (фторопласт) слоя составляла в первом случае 2 мм, а во втором – 3 мм. Измеряемая двухслойная структура из арсенида галлия в виде сильнолегированного эпитаксиального слоя на полуизолирующей подложке помещалась внутри нарушенного слоя вплотную к его правой границе.

Изменение длины центрального нарушения приводило к изменению положения примесной моды колебаний («окна» прозрачности) на частотных зависимостях коэффициентов отражения и прохождения СВЧ излучения. На рис. 1 представлены экспериментальные (точки) и рассчитанные (линии) частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонной структуры при значениях толщины измеряемого эпитаксиального слоя $t = 11.56$ мкм и его электропроводности $\sigma = 90 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, определённых из решения обратной задачи с использованием системы уравнений (1), при двух значениях длины нарушенного шестого (фторопластового) слоя.

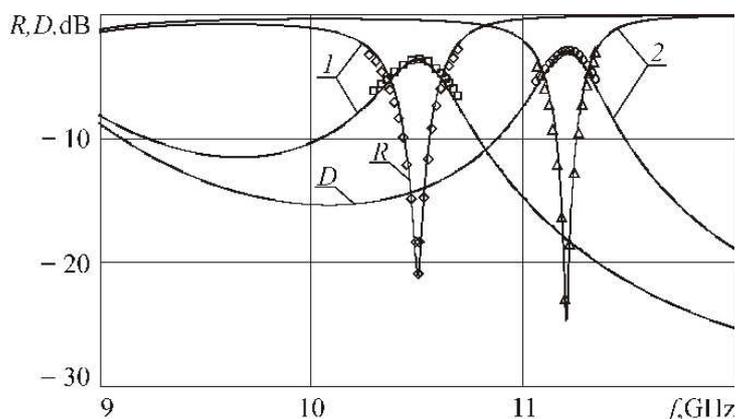


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и рассчитанные (линии) частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонной структуры при значениях длины нарушенного слоя фторопласта: 1–3 мм, 2– 2 мм. $t = 11.56$ мкм, $\sigma = 90 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Значения толщины и электропроводности эпитаксиального слоя арсенида галлия, измеренные независимыми методами, составляли соответственно 11.56 мкм и $91 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

Для измерения подвижности свободных носителей [2, 3] эпитаксиальная полупроводниковая структура помещалась в Е-плоскости в центре поперечного сечения прямоугольного волновода после фотонного кристалла с нарушенным слоем, а вектор индукции \vec{B} магнитного поля был направлен перпендикулярно узким стенкам волновода.

Если параметры эпитаксиальной структуры удовлетворяют соотношениям: $t \ll t_S$ и $\sigma \gg \sigma_S$, толщина $t + t_S$ измеряемой структуры существенно

меньше размера широкой стенки волновода a и $\omega\tau \ll 1$, то постоянная распространения волны на участке волновода, содержащем полупроводниковую структуру может быть представлена в виде [3]:

$$\gamma_m = \frac{k_0^2 \sigma t}{\beta_0 \omega \epsilon_0 a} \frac{1}{1 + \mu^2 B^2} + i \left(\beta_0 + \frac{k_0^2 (\epsilon_S - 1) t_S}{\beta_0 a} \right),$$

где k_0 и β_0 – фазовые постоянные распространения электромагнитной волны в свободном пространстве и в пустом волноводе, соответственно, ϵ_0 – постоянная вакуума, ω – частота, τ – время релаксации квазиимпульса носителей заряда, t, t_S, σ, σ_S – толщины и удельные электропроводности эпитаксиального слоя и подложки, соответственно.

В этом случае для нахождения подвижности свободных носителей заряда μ в эпитаксиальном слое по частотным зависимостям $D(f)$ и $R(f)$ используется метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение подвижности μ , при котором сумма $S(\mu)$ квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений коэффициентов пропускания и отражения, измеренных при воздействии магнитного поля и его отсутствии, вида (1) становится минимальной. В этом случае индексы 1 и 2 соответствуют результатам измерений при воздействии магнитного поля с индукцией B и его отсутствии.

На рис.2 представлены частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного излучения от фотонного кристалла с исследуемой структурой. Рассчитанное с использованием полученных данных в результате решения обратной задачи значение подвижности μ составило $0.54 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

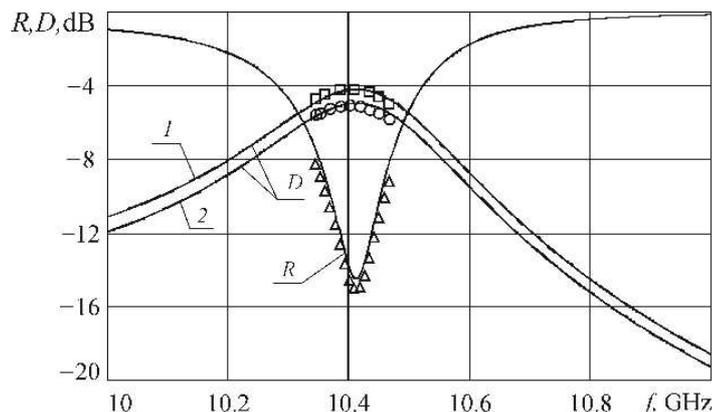


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и рассчитанные (линии) частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонной структуры. кривая 1 – $B = 0.53 \text{ Тл}$, кривая 2 – $B = 0, \mu = 0.54 \text{ м}^2/\text{Вс}$, $t = 11.56 \text{ мкм}$, $\sigma = 91 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. 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 Январь. Т.448. №1. С. 35-37.
2. V. Molnar, T.A. Kenedy, Evaluation of S- and Se-implanted GaAs by contactless mobility measurement // J. Electrochem. Soc. Solid-State Science and Technology. 1978.Vol. 125, №8, P. 1318–1320.
3. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, В.А. Поздняков, СВЧ-метод измерения подвижности свободных носителей заряда в полупроводниковых структурах // Известия вузов. Электроника. 2004. № 2. РР. 76–84.

ГЛОБУЛЯРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ, ЗАПОЛНЕННЫЕ ДИЭЛЕКТРИКАМИ И МЕТАЛЛАМИ

В.С. Горелик¹, О.А. Троцкий²

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

E-mail: ootroitsky@rambler.ru

Сообщается о результатах экспериментальных исследований оптических свойств глобулярных фотонных кристаллах [1], в поры которых вводились жидкости, металлы и сегнетоэлектрики. Глобулярные фотонные кристаллы представляют собой композиты, образованные гранецентрированной кубической решеткой глобул (шаров) аморфного кварца SiO₂ (кремнезёма) диаметром от 200 до 800 нм (в зависимости от образца). Решеточные пустоты в таких кристаллах имеют размер от 50 до 150 нм соответственно. Присутствие пор позволяет вводить в опаловые матрицы различные вещества, что позволяет изменять их оптические свойства.

Были исследованы образцы опаловых матриц с различными диаметрами глобул (от 205 до 290 нм), заполненных следующими веществами: воздухом, дистиллированной водой, водной взвесью золота, спиртовой взвесью иодида калия, водной взвесью титаната бария, а также оксидом европия.

Спектроскопические исследования проводились по схеме 180-градусной регистрации (схема «на отражение» – рис.1).

Свет от источника излучения 1 (дейтериевой или галогенной лампы) по оптоволокну подавался на входной канал двухжильного световода, заканчивающегося зондом 2, присоединенным к кювете с образцом 3. Отраженное излучение по другому оптоволоконному каналу поступало на вход цифрового спектрометра 4, подключенного к компьютеру 5. Наблюдаемый вид спектров отражения широкополосного электромагнитного излучения свидетельствовал о присутствии так называемых стоп-зон – спектральных областей сильного отражения электромагнитного излучения от поверхности опаловых матриц.

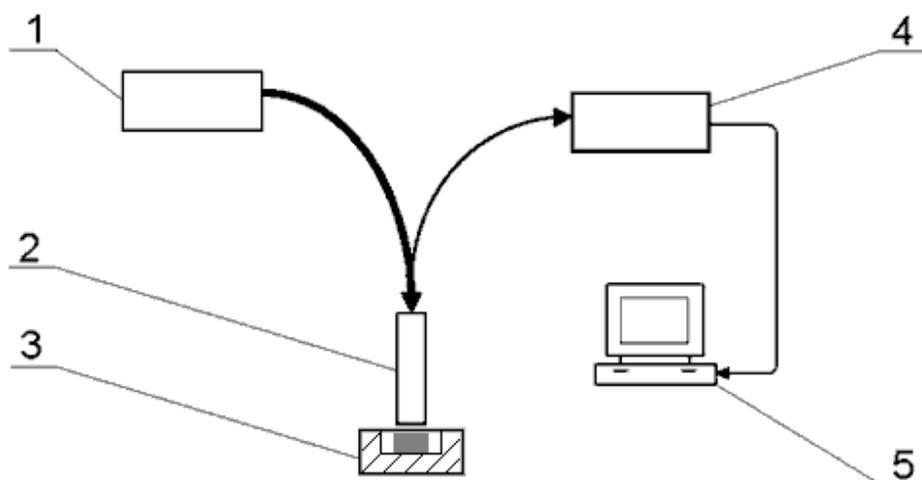


Рис. 1. Установка для регистрации спектров отражения: 1 – источник излучения, 2 – световод, 3 – кювета с образцом, 4 – спектрометр, 5 – компьютер

На рис.2 приведены полученные спектры отражения от исходных опалов (заполненных воздухом) с различными диаметрами глобул. Как видно из этого рисунка, с увеличением диаметра глобул и, соответственно, периода решётки фотонного кристалла наблюдается сдвиг спектрального положения стоп-зон в сторону больших длин волн в соответствии с известной формулой Брэгга-Вульфа.

Рис.3 иллюстрирует аналогичные спектры, полученные для опалов, заполненных водой или водной взвесью золотых наночастиц.

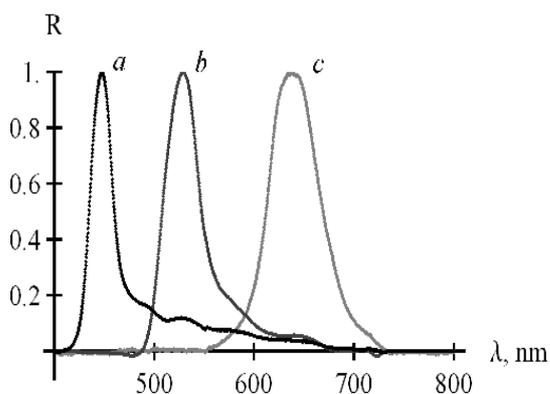


Рис. 2. Спектры отражения электромагнитного излучения от поверхности (111) исходных опалов с различными диаметрами кварцевых глобул D : (a) 205 нм, (b) 240 нм, (c) 290 нм

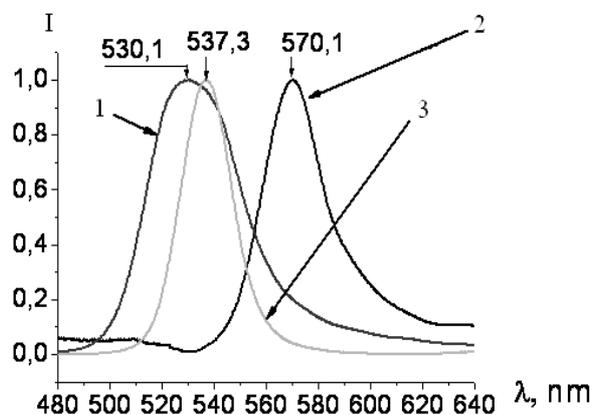


Рис. 3. Спектры отражения электромагнитного излучения от поверхности (111) опала с металлическими включениями: (1) – спектр исходного опала; (2) – спектр образца, насыщенного водой; (3) – спектр кристалла, заполненного водной взвесью золотых наночастиц. Диаметр глобул образца $D= 250$ нм

Таким образом, созданы нанокомпозиты с управляемыми оптическими свойствами, представляющие как общенаучный, так и практический интерес.

Библиографический список

1. V. S. Gorelik. Optics of Globular Photonic Crystals // Laser Physics. 2008. V.18(12). P. 1479–1500.

МЕТОД РАСЧЕТА ВОЛНОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

М. Ю. Захарченко, Ю. Ф. Захарченко*

Саратовский государственный технический университет
им. Ю.А. Гагарина

*СФ Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: knal89@mail.ru

В настоящее время активно изучается вопрос о применении электромагнитных и фотонных кристаллов на основе диэлектрических и металлических решеток в перспективных радиоэлектронных устройствах ММ, суб-ММ и оптического диапазона в качестве фазосогласующих элементов, волноводов, антенн, полосовых фильтров, систем СВЧ взаимодействия с заряженными частицами в вакууме и в полупроводниках [1 - 3].

Радиофизическая задача для данных устройств решается с помощью численных сеточных методов на основе интегральных уравнений, конечно-разностных схем и конечных элементов [4, 5]. Эти методы очень трудоемки и часто не обеспечивают требуемой точности вычислений.

В данной работе предложен эффективный метод расчета электродинамических параметров диэлектрических, металлодиэлектрических и металлических регулярных решеток с криволинейным контуром поперечного сечения стержней. Метод основан на описании электромагнитного поля в виде суммы собственных функций волнового уравнения в цилиндрической системе координат (ρ, ψ, z) , где ось z направлена вдоль оси стержня. Одновременно используются волновые функции нескольких систем координат с центрами, которые могут располагаться вне и внутри контура поперечного сечения. Все системы координат связаны между собой с помощью функций преобразования координат. Неизвестные коэффициенты перед волновыми функциями определяются путем разложения краевых выражений для электрического поля на контуре сечения стержней в ряды Фурье по одномерным или двумерным ортогональным многочленам.

Метод апробирован при расчете параметров металлических и диэлектрических решеток с конфигурациями поперечного сечения стержней, приведенными на рис. 1. Точность, достигаемая при проверке выполнения краевых выражений для электромагнитного поля, составляет от трех до семи знаков после запятой. При этом обеспечивается высокая производительность вычислений.

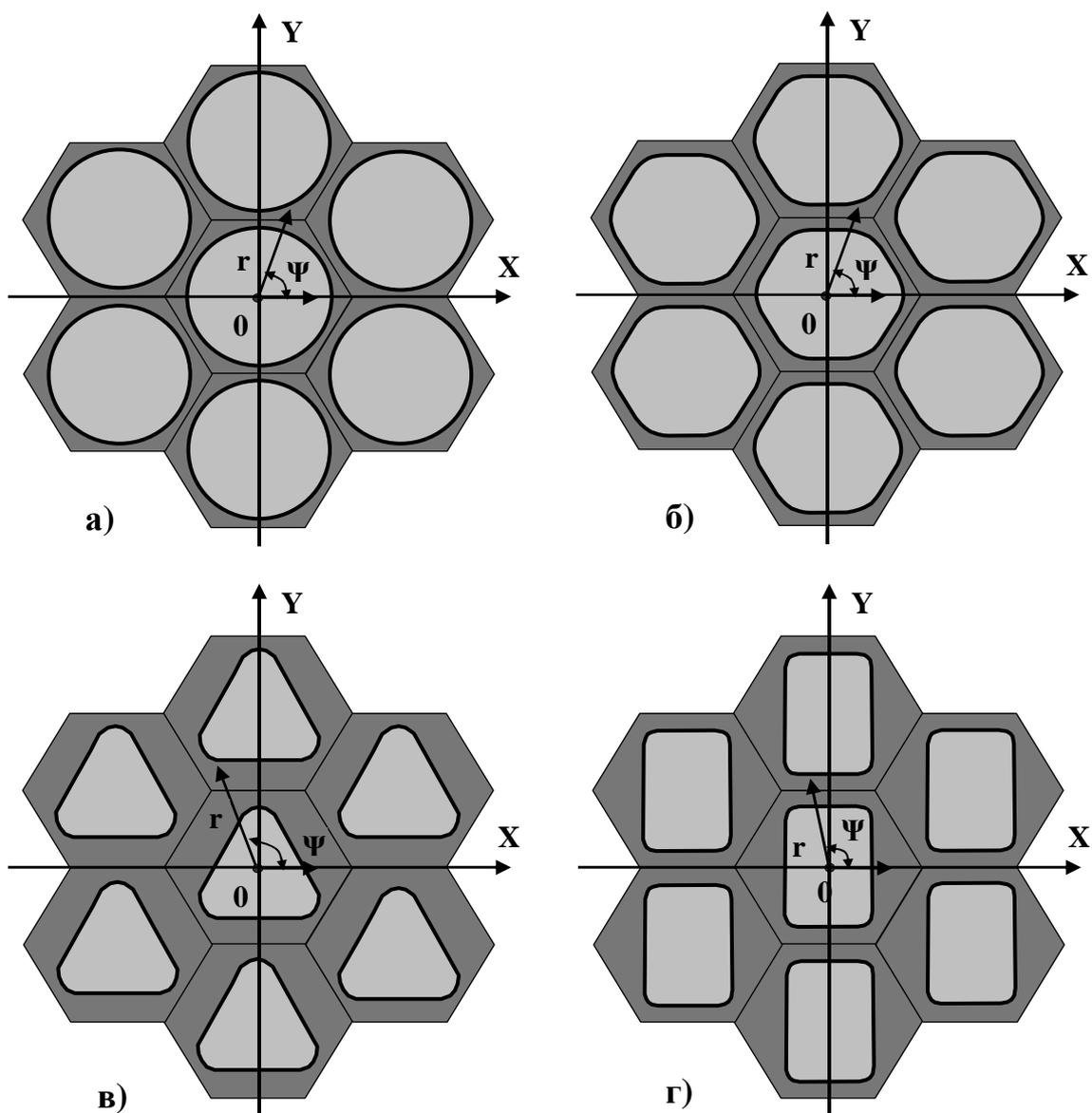


Рис. 1. Диэлектрическая регулярная решетка со стержнями, имеющими контур поперечного сечения в форме: окружности (а), шестигранника (б), трехгранника (в) и четырехгранника (г).

Библиографический список

1. *Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. – Princeton, NJ: Princeton University Press, 1995. 137 p.
2. *Банков С. Е.* Электромагнитные кристаллы / С. Е. Банков. – М.: Наука. Физматлит, 2010. – 352 с.
3. *Силин Р. А.* Замедляющие системы / Р. А. Силин, В. П. Сазонов. – М.: Сов. радио, 1966. – 631 с.
4. *S. G. Jeon, J. I. Kim, S. T. Han and S. S. Jung.* Theoretical Study of DC-biased Single-Surface Multipactors // *Physics of Plasmas*. V. 16. July 2009. P. 073101-073101-7
5. *Ильин В. П.* Численные методы решения задач электрофизики. – М.: Наука. Физматлит, 1985. С.336.

МОДЕЛЬ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДИПОЛЕЙ ДВУХСЛОЙНЫМ ЭКРАНОМ ИЗ КИРАЛЬНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

В. Т. Ерофеевко

Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: bsu_erofeenko@tut.by

Рассмотрим двухслойный экран D ($0 < z < \Delta$) = Ω_1 ($0 < z < \Delta_1$) \cup Ω_2 ($\Delta_1 < z < \Delta$), слои которого заполнены биизотропным материалом с материальными параметрами $\epsilon_j^c = \epsilon_j \epsilon_0$, $\mu_j^c = \mu_j \mu_0$, $G_j = Z_j = ik_j/c$, $j = 1, 2$. Полупространства D_1 ($z < 0$), D_2 ($z > \Delta$) характеризуются постоянными ϵ_0, μ_0 . В области D_1 в точке $O_1(0, 0, -h)$, $h > 0$, расположен точечный источник из электрических и магнитных диполей с полем \vec{E}_0, \vec{H}_0 [1], воздействующим на экран D . В область D_2 проникает поле \vec{E}_2, \vec{H}_2 , в областях Ω_j поля \vec{E}_j^c, \vec{H}_j^c удовлетворяют уравнениям Максвелла для биизотропной среды [2]

$$\text{rot } \vec{E}_j^c = i\omega(\mu_j^c \vec{H}_j^c + Z_j \vec{E}_j^c), \quad \text{rot } \vec{H}_j^c = -i\omega(\epsilon_j^c \vec{E}_j^c + G_j \vec{H}_j^c) \quad \text{в } \Omega_j. \quad (1)$$

В работе аналитически решена краевая задача дифракции поля \vec{E}_0, \vec{H}_0 на экране D для уравнений (1).

Показано, что для фокусировки поля диполей за экраном [1] необходимо выполнение условий $\epsilon_1 \mu_2 + \epsilon_2 \mu_1 = 2(1 - k_1 k_2)$, $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \mu_1 + \mu_2 = -4$, $k_1^2 + \epsilon_1 \mu_1 = 1$, $k_2^2 + \epsilon_2 \mu_2 = 1$, $k_2(\epsilon_1 - \mu_1) = k_1(\epsilon_2 - \mu_2)$.

Разрешая систему нелинейных уравнений, определим материальные параметры слоев Ω_j , которые образуют двухпараметрическое многообразие M :

$$\begin{aligned} \epsilon_1 = \tau_1, \quad \epsilon_2 = \tau_2, \quad a(\tau_1 \tau_2) k_1^4 - 2b(\tau_1 \tau_2) k_1^2 + c(\tau_1, \tau_2) = 0, \quad k_1 = k_1(\tau_1, \tau_2), \quad k_2 = k_1(\tau_2, \tau_1), \\ \mu_1 = \mu_1(\tau_1, \tau_2) = (\tau_1(\tau_1 + \tau_2 + 4) + 2(1 - k_1 k_2)) / (\tau_2 - \tau_1), \quad \mu_2 = \mu_1(\tau_2, \tau_1), \\ a = \tau_1 + \tau_2, \quad b = \tau_2 + \tau_1(\tau_1^2 + \tau_1 \tau_2 + 2\tau_1 - 1), \quad c = \tau_2 - \tau_1(3 + 2\tau_1 \tau_2 + 4\tau_1 - \tau_1^2(4\tau_1 + \tau_1 \tau_2 + \tau_1^2 + 2)), \end{aligned}$$

где τ_1, τ_2 – произвольные комплексные числа.

Возможны другие варианты многообразий.

При приближении материальных параметров слоев Ω_j к многообразию M поле \vec{E}_2, \vec{H}_2 за экраном преобразуется в поле диполей, сосредоточенных в точке $O_f(0, 0, 2\Delta - h)$, $0 < h < \Delta$. В работе [3] используется лучевая теория для анализа фокусирующих свойств двухслойной линзы. В [4,5] обсуждаются проблемы линзы Веселаго.

Библиографический список

1. *Ерофеенко В.Т., Бондаренко В.Ф.* Численное исследование взаимодействия электромагнитных полей электрического и магнитного диполей с композитным экраном // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-тех.н. 2013. № 4. С. 113–120.
2. *Ерофеенко В.Т., Козловская И.С.* Аналитическое моделирование в электродинамике. // М.: ДК Либроком. 2014. С.304.
3. *Шевченко В.В.* Геометрическая теория плоской линзы из кирального метаматериала // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 6. С. 696–700.
4. *Миттра Р.* Критический взгляд на метаматериалы // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 9. С. 1051–1058.
5. *Анютин А.П., Шатров А.Д.* О резонансных свойствах ближнего поля в тонких линзах Веселаго и Пендри конечных размеров // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. №9. С. 1012–1019.
6. *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. 1967. Т. 92. №3. С.517–521.

2. ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ГЕТЕРОДИНА НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

А.И. Михайлов, Р.И. Хабиров¹, В.Ю. Андреева¹

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

¹ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г.Саратов

E-mail: mikhailovai@info.sgu.ru, gukovavu.89@mail.ru

С ростом интенсивности морского судоходства и увеличением размера судов происходит постоянное усложнение навигационной обстановки, что приводит к значительным трудностям в управлении судами в открытом море при переходах, в прибрежных районах и при подходах к портам. Постоянно растут требования к безопасности и экономической эффективности судовождения, возникает потребность в более качественном и современном навигационном оборудовании. Радиолокатор на данное время остается единственным средством обнаружения и сопровождения, способным работать со всеми целями.

Современные бортовые радиолокационные системы включают в себя большое количество подсистем более низкого порядка. В процессе работы РЛС частота передатчика и гетеродина неизбежно изменяются под воздействием различных дестабилизирующих факторов, отрицательно влияющих на работу всей системы. Для решения данных проблем используют автоматическую подстройку частоты (АПЧ).

Важность исследования и проектирования систем автоматической подстройки частоты заключается в том, что ее параметры и характеристики в значительной степени определяют эффективность работы радиотехнической системы в целом [1].

По типу измерительного элемента системы АПЧ делятся на частотные и фазовые (ФАПЧ). В частотных системах АПЧ в качестве измерительного элемента используются частотные детекторы, а в ФАПЧ – фазовые детекторы.

Существует множество разработанных систем АПЧ такие как: система импульсно-фазовой автоподстройки частоты [2], система ФАПЧ с фильтром второго порядка [3], система ФАПЧ с широкодиапазонными автогенератора-

ми, управляемым напряжением [4], а также двухкольцевые системы АПЧ [1]. Но из-за разнообразия требований, предъявляемых для систем АПЧ, зачастую вышеупомянутые системы сталкиваются с трудностями, как в проектировании, так и в достижении желаемых результатов.

Например, в системах ФАПЧ быстродействие очень мало, а также происходит срыв синхронизации в момент отсутствия источника опорного сигнала. На базе ФАПЧ существует достаточно большое количество систем, результаты исследований которых показывают, что выходные параметры не являются оптимальными. Исследования показали, в ФАПЧ с фильтром второго порядка область хаотически модулированных колебаний очень мала [3]. В современных системах импульсно-фазовой подстройки частоты с широкодиапазонными автогенераторами, управляемыми напряжением, возникают иные проблемы. Обеспечение широкополосности автогенератора приводит к высокой крутизне управления генератором, что в свою очередь приводит к недопустимо большому паразитным угловым модуляциям [4]. Аналогом АПЧ на базе микроконтроллера стала разработанная ранее цифровая система ФАПЧ на базе микроконтроллера [5]. Но она являлась очень медленной.

В связи с этим целью нашей работы являлась разработка системы автоматической подстройки частоты с высокими показателями по всем параметрам. Выполнение данной цели осуществляется с помощью введения в систему АПЧ комплекса с фильтрами высоких и низких частот, а также системы управления с микроконтроллером.

В данном докладе приводятся результаты смоделированной системы автоматической подстройки частоты с микроконтроллером. Разработанный модуль входит в систему приемных устройств трехсантиметрового диапазона длин волн для радиолокационных станций контроля надводной обстановки. АПЧ в данной системе выполняет функцию управления частотой гетеродина и контроля захвата АПЧ. Модуль на выходе выдает диапазон частот 8,02 - 8,52 ГГц. В разработанном модуле вместо системы ФАПЧ введен комплекс с фильтрами высоких и низких частот и микроконтроллера ATmega325P, архитектура которого стала стандартом на мировом рынке 8-разрядных микроконтроллеров. Данная система обеспечивает высокое быстродействие, помехоустойчивость, стабильность. Это дало более точные значения выходной частоты сигнала гетеродина.

Работа выполнена при поддержке предприятия ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (Саратов).

Библиографический список

1. Терещенко С.В. Двухкольцевые системы автоматической подстройки частоты с эллиптическим фильтром // Радиотехника. 2010. № 11. С. 34-38.
2. Никитин Ю.А. Частотный метод анализа синтезаторной системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты // Современная электроника. 2007. №4. С.50.
3. Матросов В.В. Нелинейная динамика системы фазовой автоподстройки частоты с фильтром второго порядка // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. XLIX, №3. С.267-278.

4. Раманов С.К., Тихомиров Н.М., Лукинова А.И., Тихомиров В.Н. Быстрая автоматическая частотная настройка широкодиапазонных управляемых генераторов в синтезаторах частот // Теория и техника радиосвязи. 2012. №2. С. 57-62.
5. Одинцова Д.А. Цифровая система фазовой автоподстройки частоты в применении к фильтрации шумов при сравнении и изменении частот // Всероссийская конференция. Санкт-Петербург. 2012. С.3-43.

СВЧ-УМНОЖИТЕЛИ ВЫСОКОЙ КРАТНОСТИ

Д.А. Усанов, В.Н. Посадский, А.В. Скрипаль, В.С. Тяжлов, Д.В. Григорьев
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Умножители частоты – важнейшие элементы формирователей (синтезаторов) частот, активными элементами которых чаще всего выступают полупроводниковые умножительные диоды [1]. Умножители частоты, как правило, имеют меньший уровень шума по сравнению, например, с генератором, при отстройке частоты от основной в ближней зоне на 300 Гц – 2 кГц. Схема умножителя частоты может строиться либо как многокаскадное устройство, состоящее из нескольких умножителей частоты с небольшой кратностью (обычно 2 или 3), либо как однокаскадная схема с умножением высокой кратности (больше 10) [2]. Схемы с высокой кратностью умножения, активно исследуемые в последние годы, пока сравнительно мало используются на практике в связи с малыми амплитудами гармоник и, как следствие, необходимостью использования высокочувствительного оборудования при работе с сигналом на выходе.

Известно, что в реальных умножителях сантиметрового (по выходной частоте) диапазона длин волн, при коэффициенте умножения, равном двум, максимально достигаемый коэффициент преобразования составляет 60-70 %. При увеличении коэффициента умножения коэффициент преобразования падает. Например, в умножителях частоты на три он уже не превышает 40...50 %, а в умножителе частоты на восемь составляет всего 10–12 % [3]. Тем не менее, они обеспечивают меньшие шумы, энергопотребление, габариты и вес, что особенно важно, когда речь идет о бортовых системах.

В современной технике в качестве умножителей используют активные элементы: транзисторы и диоды. Вторые более популярны благодаря простым схемам включения и высоким коэффициентом преобразования гармоник. В качестве преобразователя, в наиболее распространенных схемах используется, как правило, один диод. Однако есть примеры использования и двух диодов, в частности, при преобразовании сигнала вверх [4]. В работе [4] это позволило увеличить коэффициент преобразования и снизить КСВН системы. Поэтому весьма интересно будет использовать в качестве умножителей частоты два встречно направленных диода, включенных параллельно.

В данной работе исследованы характеристики микрополосковых умножителей частоты с кратностью умножения 24.

Для измерений использовался анализатор спектра Agilent PXA E4440. Мощность входного сигнала на частоте 111,98 МГц составляла 60 мВт.

Были проведены исследования спектров выходного сигнала на частоте, соответствующей 24-й гармонике входного сигнала, при использовании в качестве нелинейного элемента одного умножительного диода или двух встречно включенных диодов. В качестве умножительных диодов использовались серийно выпускаемые планарно-эпитаксиальные диоды 2A604A.

В результате экспериментов установлено, что при использовании одного умножительного диода выходная мощность на 24-й гармонике входного сигнала составляла $-42,27$ дБм, в то время как при использовании двух встречно включенных диодов составляла $-37,86$ дБм.

Для выделения из спектра выходного сигнала 24-й гармоники входного сигнала использовался выходной полосно-пропускающий фильтр, настроенный искомым на 24-ю гармонику, выполненный в микрополосковом исполнении. Следует отметить, что в полосе пропускания фильтра, соответствующей 24-й гармонике, ослабление сигнала составляло ~ 10 дБ.

Спектры выходного сигнала при наличии в схеме полосно-пропускающего фильтра, настроенного на 24-ю гармонику, при использовании одного и двух умножительных диодов представлены на рис. 1 и 2, соответственно. На этих рисунках маркером (\blacklozenge) отмечена 24-я гармоника входного сигнала.

Из результатов экспериментов, представленных на рис. 1 и 2, следует, что при наличии в схеме полосно-пропускающего фильтра, настроенного на 24-ю гармонику, при использовании одного умножительного диода выходная мощность на 24-й гармонике входного сигнала составляла $-23,35$ дБм, в то время как при использовании двух встречно включенных диодов составляла $-19,60$ дБм.

Одним из важнейших параметров умножителей высокой кратности является спектральная плотность мощности частотных флуктуаций на частоте выходного сигнала. Как следует из результатов эксперимента использование второго умножительного диода существенно не изменяет спектральную плотность мощности выходного сигнала.

Таким образом, использование в качестве умножителей частоты высокой кратности схемы с двумя встречно включенными умножительными диодами и полосно-пропускающим фильтром, настроенным на гармонику высокой кратности, позволяет значительно ~ 4 дБ, повысить уровень мощности выходного сигнала на 24-й гармонике входного сигнала. При этом спектральная плотность мощности частотных флуктуаций на частоте выходного сигнала остаётся на уровне, соответствующем случаю использования только одного умножительного диода.

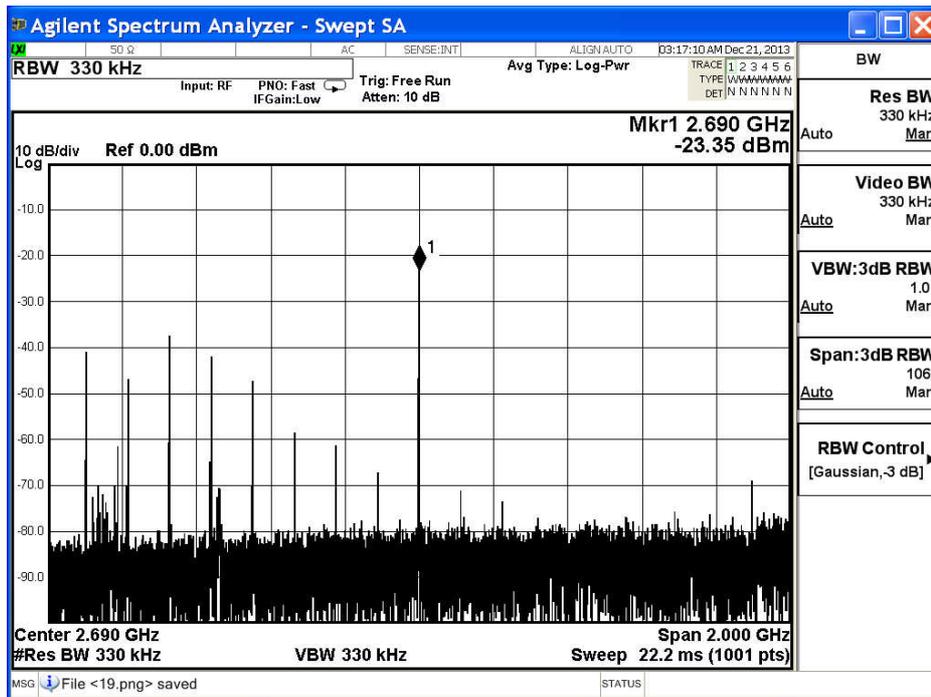


Рис. 1 Спектр выходного сигнала при наличии в схеме полосно-пропускающего фильтра, настроенного на 24-ю гармонику, при использовании одного умножительного диода

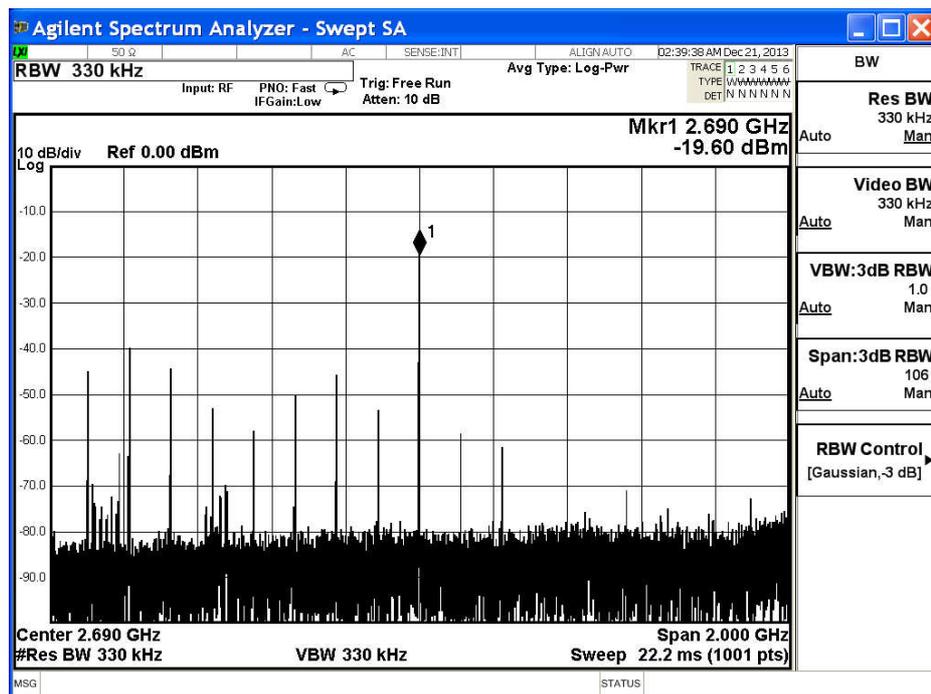


Рис. 2 Спектр выходного сигнала при наличии в схеме полосно-пропускающего фильтра, настроенного на 24-ю гармонику, при использовании двух умножительных диодов

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030), предприятия ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон».

Библиографический список

1. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники // М.: Радио и Связь. 1990. С.512.
2. *Бруевич А.Н.* Умножители частоты // М.: Советское радио. 1970. С.248.
3. *Заславский А.М.* Однокаскадные умножители частоты сверхвысокой кратности на диодах с накоплением заряда для синтезаторов частот. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ 1986. №.3. С.23-28
4. *Усанов Д.А., Абрамов А.Н., Астахов А.С.* Микрополосковый преобразователь частоты «вверх» на диодах с барьером Шоттки// Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1983, вып.4 (352). С.61–62.

СВЯЗАННЫЕ МАГНОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЛИНЕЙНЫХ СВЧ СИГНАЛОВ (МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

М.А.Морозова, О.В.Матвеев

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: olvmatveev@gmail.com

В настоящее время большой интерес вызывают кристаллы, подобные фотонным, на основе магнитных плёнок – магнонные кристаллы (МК), в которых распространяющимися волнами являются магнитостатические волны (МСВ) [1-3]. Принципиальной особенностью периодических структур является наличие брэгговских резонансов, возникающих за счёт взаимодействия прямых и встречных волн, и приводящих к возникновению запрещённых зон. Наличие запрещённых зон в спектре спиновых волн открывают широкие возможности по использованию МК в СВЧ фильтрах, линиях задержки, резонаторах и т.д.[1]. Нелинейные эффекты в ферромагнитных плёнках на основе железо-иттриевого граната проявляются при сравнительно низких уровнях мощности, порядка милливаттов. К настоящему времени показана возможность нелинейного сдвига запрещённых зон, что приводит к эффекту “нелинейного переключения МК”, при котором периодическая структура начинает пропускать сигнал большой мощности на частотах, лежащих внутри запрещённой зоны. Данная особенность позволяет рассматривать МК в качестве нелинейного фазовращателя и усилителя отношения сигнал/шум [2,3].

В настоящей работе рассматривается возможность использования для функциональной обработки нелинейных СВЧ сигналов связанных периодических ферромагнитных структур в виде двух МК (МК-МК) или в виде МК - однородная плёнка (см. рис. 1а).

На основе подхода, основанного на методе связанных волн, построена нелинейная модель, описывающая распространение магнитостатических волн в структуре связанных МК (либо МК - однородная плёнка). 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.

На основе численного исследования показано, что структуры типа МК-МК (либо МК - однородная плёнка) могут быть положены в основу многофункционального устройства, обладающего следующими возможностями.

Во-первых, такая структура может функционировать в качестве нелинейного ответвителя, в котором в зависимости от входной амплитуды импульсы выходят через разные порты связанной структуры (порты 1, 2, 3 и 4 на рис. 1а).

Во-вторых, на одном выходном порте линия передачи на связанных МК может работать как ограничитель мощности, на другом – как усилитель отношения сигнал/шум, а на третьем может работать в обоих описанных выше режимах, начиная с определенного уровня входной мощности. Другими словами, в последнем случае структура МК-МК позволяет выделять сигнал с мощностью, лежащей в некотором интервале значений (см. рис.1б).

В третьих, структуры типа МК-МК (либо МК-однородная плёнка) могут функционировать в качестве мультиплексора, позволяющего разделять сигналы на частотах, лежащих внутри и вне ЗЗ такой структуры и выводить их через разные порты связанной структуры.

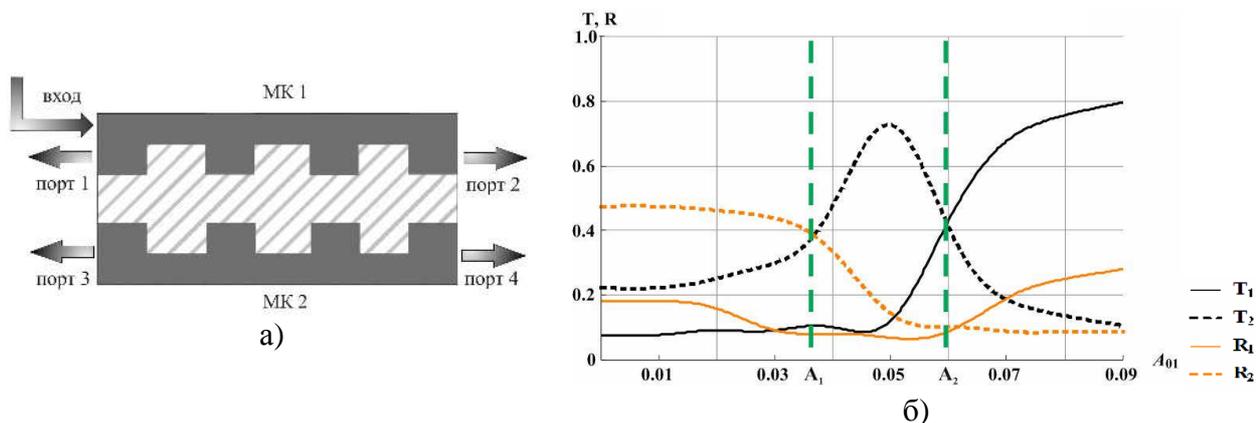


Рис. 1. (а) Схематическое изображение структуры из двух связанных МК.

(б) Передаточные характеристики в зависимости от амплитуды входного сигнала A_{01} для МК-МК в центре запрещённой зоны (T_1 – нормированная мощность, выходящая через 2 порт структуры, T_2 – через порт 4, R_1 – через порт 1, R_2 – через порт 3)

Отметим, что существует дополнительная возможность управления описанными выше эффектами с помощью изменения внешнего магнитного поля.

Полученные результаты дают возможность рассматривать исследуемую слоистую структуру МК-МК (либо МК-однородная плёнка) как систему, позволяющую эффективно управлять прохождением нелинейных импульсов и реализовывать ряд дополнительных функций на базе одной системы. Данное обстоятельство делает связанные МК уникальными объектом для использования в устройствах обработки информации в СВЧ-диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № № 13-07-12409-офи-м).

Библиографический список

1. *Nikitov S.A., Tailhadesand Ph., Tsai C.S.* Spin waves in periodic magnetic structures - magnonic crystals // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001. V. 236. №3. P.320-330.
2. *Ustinov A. B., Drozdovskii A.V., Kalinikos B. A.* Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 96. №14. P.142513.
3. *Sheshukova S.E., Morozova M.A., Beginin E.N., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A.* Formation of gap solitons in a finite magnonic crystal // *Phys. WavePhenom.*, 2013, V. 21, N. 4, P. 304-309.
4. *Louisell W. H.* Coupled mode and parametric electronics. - John Wiley, New York, 1960. 268 p.
5. *Kashyap R.* Fiber Bragg Gratings. - SanDiego: Acad. Press., 1999. 458 p.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГИС И МИС СВЧ

А.Г.Гудков¹, С.А.Мешков¹, В.В.Попов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва,

²ОАО «Светлана», Санкт-Петербург

E-mail: s.agasieva@mail.ru

Целью исследования является повышение показателей серийнопригодности и надежности гибридных и монолитных интегральных схем (ГИС и МИС) СВЧ диапазона. Элементная база современных МИС строится на основе многослойных полупроводниковых гетероструктур.

Актуальность исследования обусловлена широтой применения ГИС и МИС СВЧ в радиоэлектронике. Это сотовая связь, волоконно-оптическая связь, потребительская электроника, связанная с цифровым ТВ, автомобильные радары, спутниковая связь, беспроводная связь широкополосного доступа, радиолокаторы на активных фазированных антенных решетках и др.

Задача повышения серийнопригодности ГИС и МИС СВЧ, характеризуемая процентом выхода годных изделий, традиционно решается либо расширением полей допусков на электрические параметры устройства, что требует пересмотра тактико-технических характеристик аппаратуры, либо перестройкой технологического процесса производства и приобретением более точного технологического оборудования, что влечет за собой значительные материальные затраты. Предлагаемый в исследовании путь требует изменения сложившейся методологии проектирования конструкции ГИС и МИС и учета на этапе проектирования технологических факторов и не связан с пересмотром допусков на функциональные параметры устройства и затратами на совершенствование технологий их производства.

Проблема повышения надежности устройств на основе ГИС и МИС СВЧ решается обычно либо путем совершенствования технологического процесса производства, либо защиты от внешних воздействий при эксплуа-

тации. Первый путь сопряжен со значительными материальными затратами, поскольку требует применения более совершенного технологического оборудования для формирования микро и наноструктур. Второй путь приводит к необходимости увеличения массы и габаритов аппаратуры. Предлагаемый в проекте подход к обеспечению надежности ГИС и МИС СВЧ не требует ни более совершенного оборудования, ни совершенствования технологической оснастки. Изменения вносятся в параметры гетероструктуры (и, возможно, в технологический маршрут ее производства) и топологию микросхемы, не затрагивая ее массо-габаритных характеристик. Методической базой для решения задачи повышения надежности ГИС и МИС СВЧ является исследование физических процессов деградации гетероструктуры полупроводникового элемента под действием внешних факторов и развитием методов технологической оптимизации.

Внедрение предлагаемой методологии в практику проектирования ГИС и МИС СВЧ позволит получить снижение себестоимости на величину до 30 % и повышение надежности при заданных ограничениях на показатели назначения в условиях серийного производства изделий. Предлагаемый подход является принципиально новым и не имеет аналогов в мировой практике.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ГАННОВСКОЙ И РЕКОМБИНАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ТОКА В ВЫСОКООМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А.И. Михайлов, А.В. Митин

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: MikhailovAI@info.sgu.ru, Mitin_AV@mail.ru

Известно, что для построения функциональных устройств используются нелинейные активные среды [1,2]. К таким средам, в частности, относится арсенид галлия n-типа, в котором в сильных электрических полях возможно возникновение отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) и соответствующей неустойчивости тока (эффект Ганна) вследствие междолинного переноса электронов, а также принципиально иной неустойчивости тока – рекомбинационной, или концентрационной, обусловленной зависящим от напряженности электрического поля сечением захвата свободных электронов на глубокие примесные уровни. Рекомбинационный тип неустойчивости тока характерен как для однодолинных полупроводников (Si, Ge), так и для многодолинных (GaAs). Оба типа неустойчивости сопровождаются возникновением в объеме полупроводника динамической неоднородности – движущегося домена сильного электрического поля. При этом скорость медленных рекомбинационных доменов существенно ниже скорости ганновских доменов.

В данной работе проведен анализ литературных сведений по теоретическому и экспериментальному исследованию ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока, а также обсуждены особенности их проявления в высокоомных полупроводниках в условиях внешнего оптического воздействия с возможными перспективами применения.

Анализ известных литературных данных, включая результаты предшествующих работ авторов данной статьи [3-10], свидетельствует о том, что исследованиям ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниковых образцах (GaAs, CdTe, Ge, Si), в том числе, в условиях засветки, посвящено большое количество работ. Исследования такого рода не теряют актуальности и в настоящее время, поскольку установление механизмов управления динамикой доменов сильного поля, исследования особенностей проявления этих неустойчивостей в условиях воздействия однородного или локализованного оптического излучения открывают перспективы создания различных электронных, оптоэлектронных и электрооптических элементов и устройств с широкими функциональными возможностями, способных осуществлять прием, обработку, хранение, передачу и отображение сложных информационных сигналов в широком диапазоне частот (от десятков кГц до десятков ГГц).

На основе проведенного анализа можно заключить, что:

- 1) в сильных электрических полях в полуизолирующих многодолинных полупроводниках стационарное и нестационарное, пространственно-однородное и пространственно-неоднородное (например, локализованное) оптическое воздействие может существенно изменять частоту и спектральный состав ганновских и рекомбинационных колебаний тока, приводить к проявлению других нелинейных эффектов (таких как нелинейный оптический фоторефрактивный эффект), приводить к пространственному перераспределению электрического поля в активной области прибора;
- 2) в условиях локализованной засветки активной области образца в ее различных частях возможно одновременное существование нескольких областей сильного поля, в том числе, разных типов - дипольных доменов и обогащенных слоев, форма, размеры и скорость которых существенно зависят от величины приложенного постоянного напряжения;
- 3) увеличение интенсивности засветки может приводить к возрастанию частоты генерируемых колебаний и значительным изменениям в спектральном составе тока;
- 4) большую роль в динамике формирования, движения и исчезновения областей сильного поля в структуре в условиях засветки могут играть рекомбинационные процессы; их влияние наиболее существенно сказывается на поведении высших гармонических составляющих тока в случае сопоставимости времени пролета сформированной области сильного поля через активную область структуры и времен жизни неравновесных электронов и дырок, генерируемых светом;

- 5) характер и доминирующий механизм (междолинный перенос или захват электронов глубокими примесными уровнями) неустойчивостей тока сильно зависят от концентрации глубоких примесных центров;
- б) результаты исследований рекомбинационных неустойчивостей тока часто носят противоречивый характер, отличаются многофакторностью, недостаточной воспроизводимостью и описываются с привлечением различных физических механизмов (прыжковая проводимость, генерационно-рекомбинационные процессы, ударная ионизация, полевой захват и др.), что свидетельствует о невозможности в настоящее время сформулировать общий подход к описанию такого рода явлений и требует проведения дополнительных исследований.

Синтез приборов, устройств и систем на основе рассмотренных в данной статье особенностей нелинейных физических явлений, процессов и эффектов с использованием планарной технологии может позволить совместить неоспоримые достоинства интегральной электроники с большими возможностями функциональных компонентов. Переход от схемотехнической к функциональной интеграции в таких микроэлектронных функциональных устройствах снимает необходимость создания множества мелкоструктурных элементов и межсоединений и обеспечивает возможность локализованного оптического воздействия на активную область отдельного элемента.

Библиографический список

1. *Гуляев Ю.В.* Акустоэлектроника: (исторический обзор) // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 8. С. 887–895.
2. *Щука А.А.* Функциональная электроника // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 5–6. С. 149–168.
3. *Михайлов А.И., Митин А.В., Перепелицын Ю.Н.* Исследование спектра тока длинных образцов GaAs в условиях засветки // Физика и технические приложения волновых процессов: Тез. докл. IV Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу "Физика волновых процессов и радиотехнические системы" / Под ред. В.А. Неганова, Г.П. Ярового. Нижний Новгород. 2005. С. 170-171.
4. *Михайлов А.И., Митин А.В.* Анализ нелинейной динамики тока в длинных высокоомных образцах n-GaAs в условиях локальной засветки. Часть 1. Формулировка модели // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 2. С. 49-56.
5. *Михайлов А.И., Митин А.В.* Анализ нелинейной динамики тока в длинных высокоомных образцах n-GaAs в условиях локальной засветки. Часть 2. Результаты моделирования // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 1. С. 73-81.
6. *Михайлов А.И., Митин А.В.* Низкочастотные колебания тока в длинных планарных высокоомных структурах арсенида галлия // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды IX международной конференции. Ульяновск: УлГУ, 2007. С. 85.
7. Особенности рекомбинационных неустойчивостей тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах арсенида галлия / *А.И. Михайлов, А.В. Митин, А.И. Терентьева, А.А. Павлов* // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы докладов VIII Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». СПб.: Политехника, 2009. С. 130–131.

8. Михайлов А.И., Митин А.В. Экспериментальное исследование спектра колебаний тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах арсенида галлия в условиях засветки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 4. С. 87-91.
9. 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 // Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. СПбГЭТУ. 4-7 июня 2012: Сборник трудов конференции. Том 1. Санкт-Петербург, 2012. С. 49-53.
10. Михайлов А.И., Митин А.В., Терентьева А.И. Исследование влияния концентрации глубоких примесных уровней на возникновение устойчивых рекомбинационных и ганновских колебаний тока в длинных высокоомных структурах $n^+-n^-n-n^+-GaAs$ // Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. СПбГЭТУ. 4-7 июня 2012: Сборник трудов конференции. Том 2. Санкт-Петербург, 2012. С. 322-326.

МЕХАНИЗМЫ ТРАНСПОРТА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ В КОМПОЗИТЕ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ, ПОДВЕРГНУТЫМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОТЖИГУ

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Романов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: usanovda@info.sgu.ru, skripala_v@info.sgu.ru

Модификация углеродных нанотрубок, входящих в состав композитного материала, внешними физическими воздействиями, например: ультразвуком [1], ультрафиолетовым излучением [2], высокотемпературным отжигом [3] и т.д., существенно изменяет их электрофизические характеристики как на постоянном токе, так и в низкочастотном и сверхвысокочастотном диапазонах. При этом значение удельной электропроводности углеродных нанотрубок, измеренное в СВЧ-диапазоне, может существенно отличаться от результатов, полученных на постоянном токе или в низкочастотном диапазоне [4].

Отжиг многослойных углеродных нанотрубок проводился в муфельной печи в течение 2 часов в атмосфере аргона при различной температуре в диапазоне от 20 C^0 до 550 C^0 . В процессе отжига наблюдалось уменьшение массы навески из углеродных нанотрубок. После проведения отжига углеродные нанотрубки добавлялись в эпоксидный клей, полученная смесь затем тщательно перемешивалась до получения однородной массы. Полученную смесь заливали в кюветы с размерами $23 \times 10 \times 1$ мм. Отверждение клея происходило при комнатной температуре. Объемная концентрация углеродного наполнителя V изменялась в пределах от 0 до 0.1 отн. ед.

Исследуемые образцы композита с различной величиной объемной концентрации V углеродных нанотрубок, которые были предварительно подвергнуты высокотемпературному отжигу, вместе с микрополосковой из-

мерительной структурой помещались на нагревательный элемент, температура которого изменялась в диапазоне 293K – 363K . Температура контролировалась с помощью термопары алюмель-хромель.

Для определения электрофизических параметров композитного материала использовалась микрополосковая структура [5] в виде одномерного фотонного кристалла, состоящая из последовательно соединенных отрезков микрополосковой линии передачи с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью подложки.

Для определения комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{компл}} = \varepsilon'_{\text{компл}} - i\varepsilon''_{\text{компл}}$ композитного материала, который заполнял один из воздушных отрезков микрополосковой линии передачи, необходимо решить первую обратную задачу. По спектрам пропускания $D_{\text{эксн}}(f)$ и отражения $R_{\text{эксн}}(f)$ электромагнитного излучения, взаимодействующего с исследуемым образцом, которые обладают резко выраженной частотной зависимостью, при известном теоретическом описании этой зависимости, такая задача решалась с использованием метода наименьших квадратов [6].

В результате решения первой обратной задачи были получены зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композитного материала от объемной концентрации наполнителя из отожженных углеродных нанотрубок в зависимости от температуры нагревателя.

Концентрационные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композитов (на частоте резонанса $f \approx 3.45$ ГГц) с включениями в виде углеродных нанотрубок, предварительно отожженных при температуре 450°C , при варьировании температуры нагревателя в диапазоне 293K – 363K представлены на рис. 1

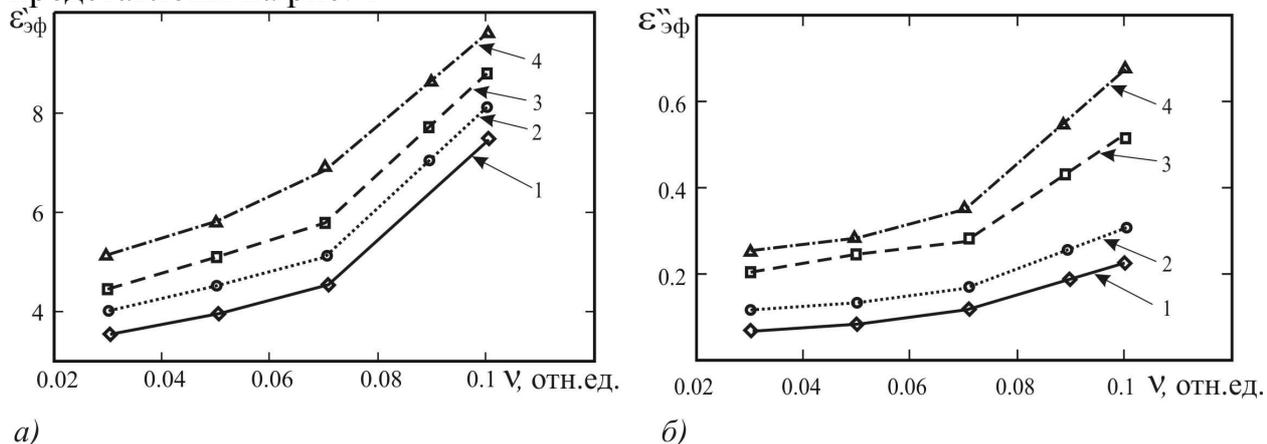


Рис. 1 Зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости композитного материала от объемной концентрации наполнителя в виде углеродных нанотрубок предварительно отожженных при температуре 450°C (а, б), измеренные при различной температуре композитных образцов (1 – 20°C ; 2 – 50°C ; 3 – 70°C ; 4 – 90°C).

Используя экспериментально определённые зависимости действительной $\varepsilon'_{\text{компл}}$ и мнимой $\varepsilon''_{\text{компл}}$ частей комплексной диэлектрической проницаемости композита от объемной доли v углеродных нанотрубок и применяя фор-

муду Нильсена, была решена вторая обратная задача по нахождению комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{унт} = \varepsilon'_{унт} - i\varepsilon''_{унт}$ углеродных нанотрубок, отоженных при различной температуре, в матрице из эпоксидного связующего.

По величине мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости углеродных нанотрубок, с использованием выражения $\varepsilon''_{унт} = \sigma_{унт} / \omega\varepsilon_0$, были определены средние значения удельной объёмной электропроводности нанотрубок $\sigma_{унт}$ в диапазоне температур 293К – 363К (см.рис. 2).

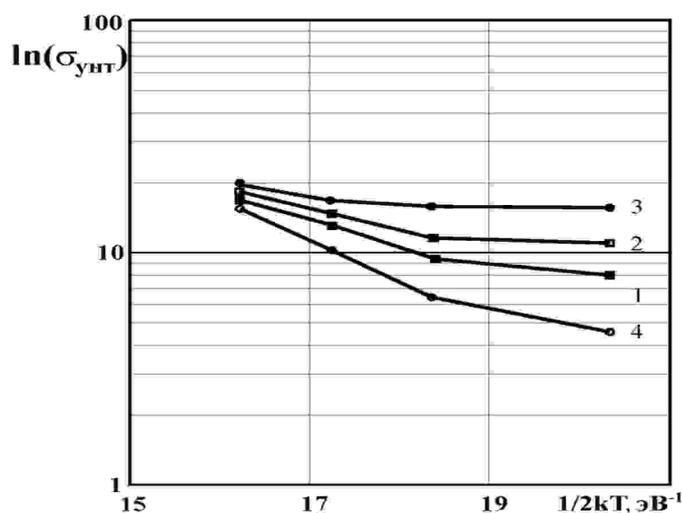


Рис. 2 Температурная зависимость удельной электропроводности углеродных нанотрубок $\sigma_{унт}$, входящих в состав композитного материала, подвергнутых предварительному отжигу при различной температуре: (1 - без отжига; 2 - 350°C; 3 - 450°C; 4 - 550°C).

Проведение отжига многослойных углеродных нанотрубок приводит к уменьшению дефектов в их структуре, в результате чего увеличивается область локализации носителей зарядов и изменяется характер температурной зависимости удельной электропроводности углеродных нанотрубок, которая, хорошо аппроксимируется линейной зависимостью в координатах $\ln(\sigma_{унт})$

от $T^{-1/4}$. При этом значение постоянной Мотта T_{M2} составляет величину 410К (при температуре отжига 450°C). Это указывает на то, что транспорт электронов в отоженных многослойных углеродных нанотрубках ассоциируется с трехмерной прыжковой проводимостью с переменной длиной прыжка [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-02-31880).

Библиографический список

1. Романов А. В., Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Влияние внешних физических воздействий на СВЧ характеристики композитных материалов, содержащих углеродные микро- и нановключения // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 3, С. 12-16.
2. Романов А. В., Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Управление СВЧ-характеристиками композитных материалов с наполнителем из углеродных нанотрубок воздействием ультрафиолетового излучения // Журнал технической физики. 2013. Т.83. №.3 С. 91-95.
3. Sergey D. Borodanov, Anatoly I. Romanenko, Olga B. Anikeeva, Vladimir L. Kuznetsov, Karina V. Elumeeva, Sergey I. Moseenkov. Temperature dependences of conductivity and magnetoconductivity of multiwall carbon nanotubes annealed at different temperatures // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2011, V. 4. №2. P. 143–148.
4. C. L. Kane, E. J. Mele, R. S. Lee, J. E. Fischer, P. Petit, H. Dai, A. Thess, R. E. Smalley, A.R. M. Verschueren, S. J. Tans and C. Dekker Temperature-dependent resistivity of single-wall carbon nanotubes // Europhys. Lett., 1998 V. 41. №6, P.683-688.
5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В., Романов А.В. Фотонные структуры в СВЧ-диапазоне и их применение для измерения параметров композитов с включениями из углеродных нанотрубок и жидких диэлектриков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. №3. С. 26-33.
6. 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.
7. By Qingwen Li, Yuan Li, Xiefei Zhang, Satishkumar B. Chikkannanavar, Yonghao Zhao, Andrea M. Dangelewicz, Lianxi Zheng, Stephen K. Doorn, Quanxi Jia, Dean E. Peterson, Paul N. Arendt, and Yuntian Zhu Structure-Dependent Electrical Properties of Carbon Nanotube Fibers //Adv. Mater. 2007. V. 19. P. 3358–3363.

СПИНОВОЕ РАЗУПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛА КАК ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПОЛЕ СВЧ – ИЗЛУЧЕНИЯ

О.А.Троцкий

Институт машиноведения им А.А.Благонравова РАН, г Москва

E-mail: otroitsky@rambler.ru

Продолжены исследования электропластического эффекта (ЭПЭ) в металлах [1,2] с учетом того, что к настоящему времени выявлен ряд механизмов действия электромагнитных полей (ЭМП) на деформацию твердых тел. ЭПЭ как кооперативное явление вообрал в себе несколько различных эффектов [3]. Механизмы их большей частью до конца не выяснены. Обладающий свойством полярности ЭПЭ включает в себя три основных действующих фактора:

- действие «электронного ветра» [1,3,4] ;
- действие пинч-эффекта [5,6];
- возможное спиновое разупрочнение металла [7-9].

Увеличение пиков ЭПЭ в поле СВЧ-излучения

Остановимся на последнем факторе как наименее изученном. Как видно из представленной на Рис.1 диаграммы деформации растяжением тонких (200 мкм) образцов нержавеющей стали, величина пиков ЭПЭ несколько возрастает в поле СВЧ- излучения, что может быть связано со спиновым разупрочнением металла (СРМ), для реализации которого требуется выполнение следующих условий:

- магнитные поля (МП), а именно собственное магнитное поле импульсного тока, участвующего через пинч-эффект в создании пиков ЭПЭ (скачков резкого разупрочнения деформируемого металла в момент прохождения импульсов тока, и электромагнитная компонента СВЧ- излучения, должны быть скрещены;
- должно быть обеспечено наличие в образцах термодинамически неравновесных процессов, в частности, генерации свежих дислокаций, что обеспечивается активной деформацией образцов при их растяжения с постоянной скоростью или в прерывистом режиме с чередованием растяжения с паузами релаксации напряжений без снятия нагрузки,
- должен быть обеспечен термодинамический выигрыш между начальным и конечным состоянием системы, что может быть достигнуто путем испытания образцов в прерывистом режиме, когда активная деформация периодически сменяется указанной релаксацией напряжений;
- время распада τ_r реакционной пары дислокация - парамагнитная примесь из триплетного Т - состояния должно быть меньше времени τ_{T-S} обратного перехода пар в синглетное S – состояние, т.е. $\tau_r < \tau_{T-S}$, чтобы ситуация не вернулась к исходному состоянию и эффект совместного действия магнитных полей не свелся к нулю.

Физическая картина реализации спинового разупрочнения металла

Реализация механизма влияния МП на спиновые степени свободы внутри деформируемого твердого тела, включая металл, протекает путем спиновой конверсии (СК), схематически показанной на Рис 2 . Изначально существуют синглетное S – состояние с $\Sigma S_i = 0$ и триплетное Т - состояние с $\Sigma T_i = 1$ реакционных пар (РП) дислокация - парамагнитная примесь (ПП) в реакционной ячейке со спинами $S = + - - 1/2.$, с чем связано торможение дислокаций. Разница в величине обменной энергии U_T и U_S , т.е. $(U_T - U_S)$ на расстояниях r_0 порядка межатомного, например, для ковалентной связи составляет примерно 1 эВ. Под влиянием МП величиной $B = 1$ Тл состояние РП не может изменяться, поскольку структурному элементу передается энергия не более $\mu_B g B = 10^{-4}$ эВ. Здесь g - фактор, который может иметь значение до 2 и более при развитых процессах СК. На больших расстояниях $r > r_0$ разница в величине обменных энергий исчезает и МП уже не может оказать существенное влияние на структурные перестройки в твердом теле. Тем не менее в указанном на рисунке окне чувствительности к МП может реализоваться спиновое разупрочнение металла (СРМ).

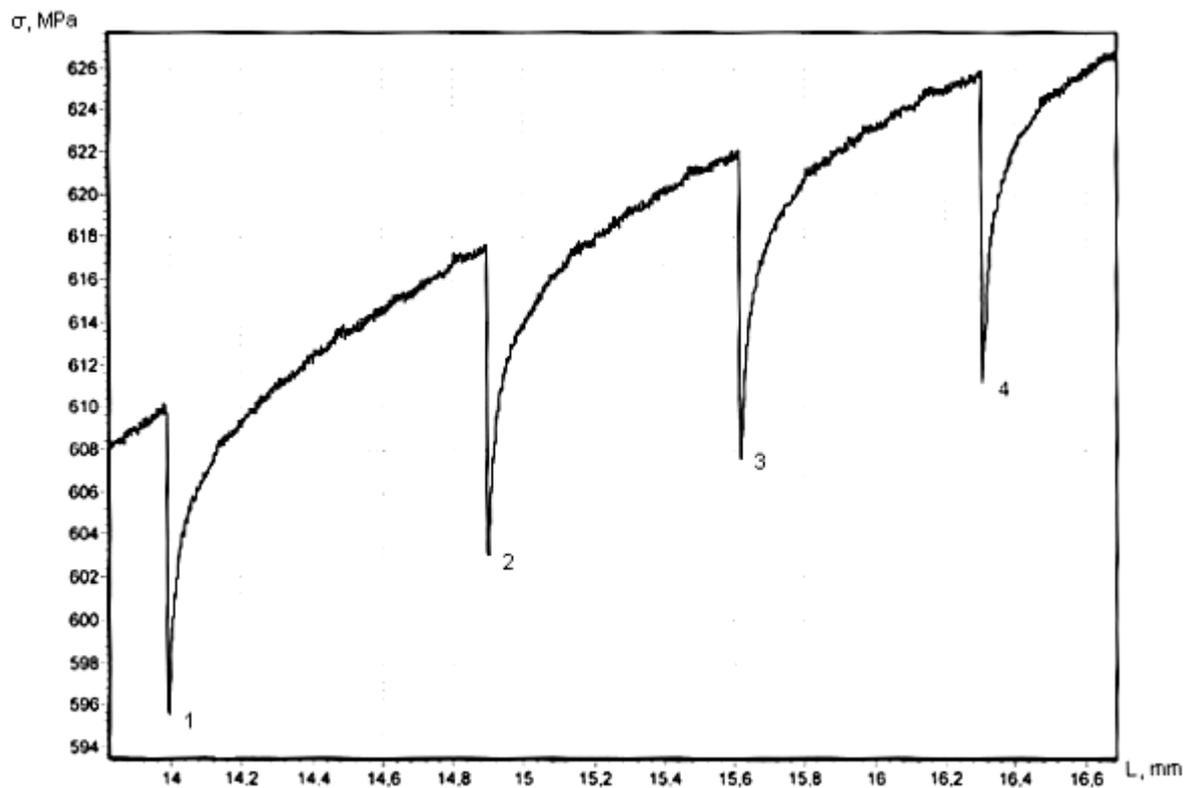


Рис. 1. Представлены скачки деформации разупрочнения при действии импульса тока J (1;3) и J + СВЧ (2;4) в условиях активной деформации. Величина скачков разупрочнения: 1 – 14,0МПа; 2 – 14,8МПа; 3 – 14,3МПа; 4 – 15,0МПа.

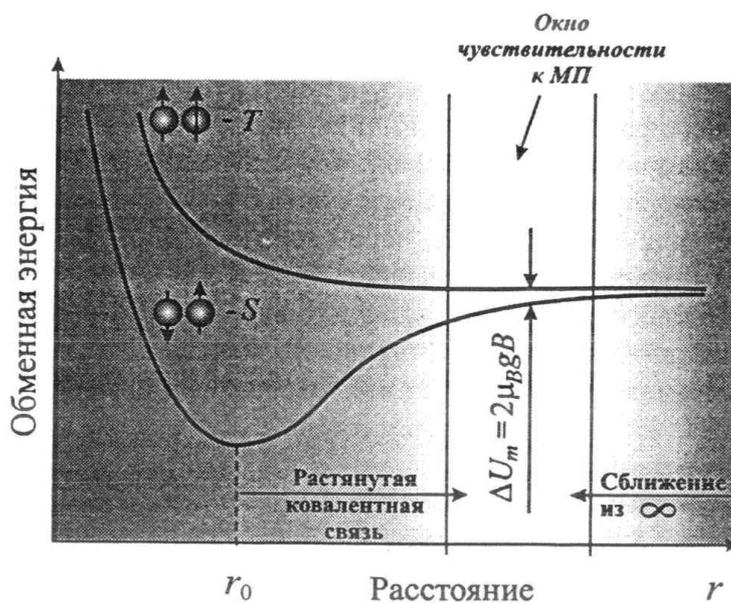


Рис.2 Схема спиновой конверсии во внешнем магнитном поле

Библиографический список

1. Троцкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма ЖЭТФ. 1969. Т.10. С.18-22.

2. *Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Аврамов Ю.С., Шлятин А.Д.* Физические основы и технологии обработки современных металлов. В 2 томах. – Ижевск – Москва: РХД, 2004. 592 с.
3. *Багаутдинов А.Я., Громов В.Г., Головин Ю.И., Троицкий О.А. и др* Структура и свойства перспективных металлических материалов. – Томск: НТЛ, 2007. 575 с.
4. *Зуев Л.Б., Громов В.Е., Курилова И.Ф.* Подвижность дислокаций в монокристаллах Zn при действии импульсов тока // ДАН СССР. 1978. Т.239, № 1. С. 84-85.
5. *Троицкий О.А.* Пластическая деформация металла, вызванная пинч- эффектом. // Изв. АН СССР, сер. Физическая. 1977. № 6. С. 118 – 122.
6. *Спицын В.И., Троицкий О.А.* Моделирование теплового и пинч-эффекта импульсного тока на пластическую деформацию металла // ДАН СССР. 1975. № 5. С. 1070 – 1073.
7. *Molotskii M., Fleurov V.* Dislocation paths in a magnetic field // J Phys. Chem. 2000. V. 104. P. 3812 – 3816.
8. *Molotskii M.* Plasticity of Ferromagnets near the Curie Point // Philosophical Magazine B. 2003. V. 83. №. 12. P. 1421-1430.
9. *Молоцкий М.* Возможный механизм магнитопластического эффекта // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 3112-3114.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СВЯЗАННЫХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

М.А.Морозова, О.В.Матвеев, Ю.П.Шараевский

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: olvmatveev@gmail.com

В настоящее время большой интерес вызывают периодические структуры микронных или субмикронных размеров, сформированные на поверхности ферромагнитных пленок, - магнонные кристаллы (МК) [1]. В таких кристаллах распространяются спиновые волны (магноны). В отличие от фотонных кристаллов, которые используются в оптических системах [2], МК исследуются, в основном, в микроволновом диапазоне длин волн. Наличие пространственного периода приводит к возникновению в спектре спиновых волн запрещенных зон (ЗЗ), что позволяет создавать на основе магнонных кристаллов перестраиваемые магнитным полем устройства для обработки и генерации сигналов в микроволновом диапазоне [1]. В этом случае актуальной является также задача управления характеристиками запрещенных зон в спектре распространяющихся волн (см., например, [3]).

К настоящему времени показана возможность нелинейного сдвига ЗЗ, что приводит к эффекту «нелинейного переключения МК», при котором периодическая структура начинает пропускать сигнал на частотах, лежащих внутри ЗЗ, если мощность входного сигнала выше точки «нелинейного переключения МК» ($A_{МК}$). Данная особенность позволяет рассматривать МК в качестве нелинейного фазовращателя и усилителя отношения сигнал/шум, а также приводит к формированию щелевых солитонов в запрещенной зоне МК [4].

В настоящей работе впервые построена нелинейная модель для периодической структуры, которая представляет собой два связанных магнитных кристалла, и на ее основе проведено численное исследование поведения нелинейных характеристик такой структуры. Необходимо отметить, что связанные структуры существенно расширяют функциональные возможности любых радиотехнических систем, т.к. появляется дополнительный управляющий параметр – связь, и широко используются как в микроволновой технике, так и в оптических системах [2]. Как показано в [5] применительно к двум связанным МК, наличие связи между периодическими структурами в линейном случае приводит к формированию двух запрещённых зон: высокочастотной запрещённой зоны для быстрых волн и низкочастотной запрещённой зоны для медленных волн.

Одна из схем связанной структуры в виде двух магнитных кристаллов (МК-МК), которая рассматривается в работе, показана на рис. 1а. В этом случае характеристики запрещённых зон определяются двумя коэффициентами связи. Один из них определяет связь между прямой ($A_{1,2}$) и встречной ($B_{1,2}$) волнами и зависит только от параметров периодической структуры. Другой определяется связью между ферромагнитными пленками и приводит к изменению фазовых и групповых скоростей распространяющихся волн в структуре.

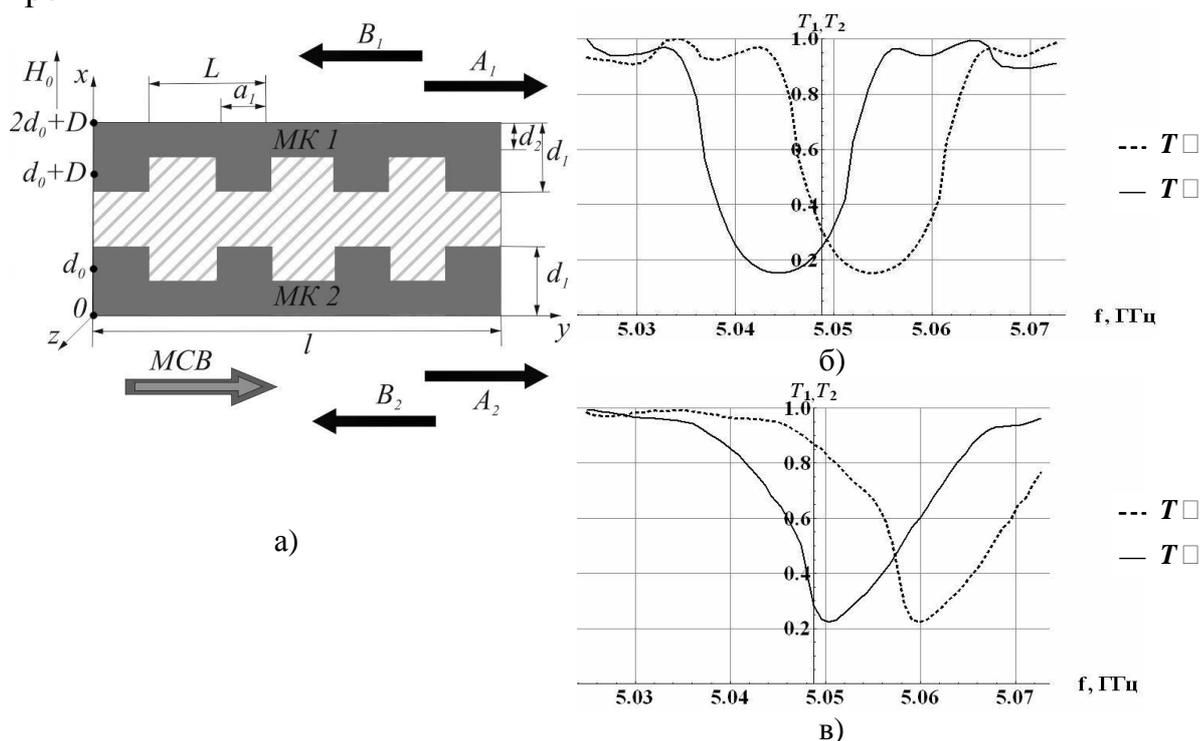


Рис. 1. (а) Схема структуры из двух связанных МК. (б,в) Зависимости коэффициента пропускания структуры от частоты входного сигнала для быстрых волн (пунктирная кривая) и медленных волн (сплошная кривая) при различных значениях амплитуд входного сигнала: $A_{01} = 0.01$ (б); $A_{01} = 0.04$ (в)

Показано, что имеет место нелинейный сдвиг запрещённых зон, причём ЗЗ для быстрой волны сдвигается на большую величину с увеличением амплитуды входного сигнала, чем ЗЗ для медленной (см. рис. 1в).

На рис. 2 приведена пространственно-временная эволюция амплитуд огибающей прямых волн $A_{1,2}$ и встречных волн $B_{1,2}$ в МК 1 и МК 2 при различных значениях амплитуд входного импульса A_{01} , если сигнал подается на вход МК 1. В частности, импульс малой входной амплитуды (меньше точки переключения $A_{МК}$, т.е. $A_{01} < A_{МК}$) отражается, а импульс большой амплитуды ($A_{МК} < A_{01}$) проходит через МК-МК. Такая динамика аналогична случаю одиночного МК. При дальнейшем увеличении амплитуды МК-МК ведёт себя как связанные однородные плёнки. Так, при входной амплитуде меньшей чем в точке переключения $A_{плл}$ ($A_{МК} < A_{01} < A_{плл}$) импульс выходит из МК 2 (рис. 2б), а большей чем в точке переключения $A_{плл}$ ($A_{плл} < A_{01}$) выходит из МК 1 (рис. 2в). Таким образом, в структуре МК-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 структуру МК-МК для осуществления ряда операций по функциональной обработке нелинейных СВЧ сигналов. В частности, на основе численного исследования показано, что линия передачи на основе связанных МК может функционировать как нелинейный направленный ответвитель. Принцип действия ответвителя заключается в следующем: в зависимости от входной мощности импульс выйдет через один из четырёх портов связанной структуры.

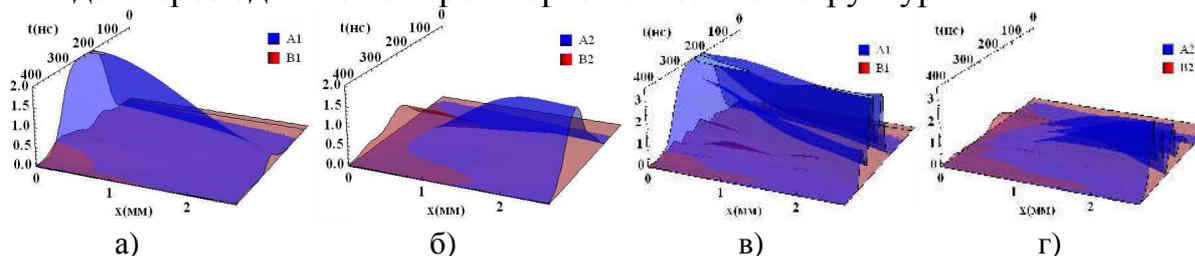


Рис. 2. Пространственно-временная эволюция амплитуд огибающих прямых волн и встречных волн в МК 1 и МК 2 при амплитуде входного сигнала (а,б) $A_{МК} < A_{01} < A_{плл}$, (в,г) $A_{плл} < A_{01}$

Полученные результаты могут быть использованы для создания частотно-избирательных устройств обработки информации в СВЧ диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-00577-а)

Библиографический список

1. Nikitov S. A., Tailhades Ph., Tsai C.S. Spin waves in periodic magnetic structures - magnonic crystals // JMMM. 2001. V. 236. № 3. P.320-330.
2. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings. - San Diego: Acad. Press., 1999. 458 p.
3. Arian M., Au Y., Vasile G., Ingvarsson S., Kruglyak V.V. Broadband injection and scattering of spin waves in lossy width-modulated magnonic crystal waveguides // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. №13. P.135003.
4. Sheshukova S.E., Morozova M.A., Beginin E.N., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Formation of gap solitons in a finite magnonic crystal // Phys. Wave Phenom. 2013. V. 21. №4. P 304-309.

5. Морозова М.А., Шараевская А.Ю. Дисперсионные характеристики магнитоэлектрических волн в связанных магнитных кристаллах// Гетеромагнитная микроэлектроника. 2013. №15. С. 82–93.

ОСОБЕННОСТИ МНОГОМОДОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ОДНОМЕРНОМ МАГНИТНОМ КРИСТАЛЛЕ

Е.Н. Бегинин, С.Е. Шешукова, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: egbegin@gmail.com

В настоящее время активно исследуются свойства магнитоэлектрических волн (МСВ), распространяющихся в планарных тонкопленочных ферритовых волноводах с пространственной периодической модуляцией его параметров: намагниченности феррита [1], толщины или ширины волновода [2-4], внешнего магнитного поля [5]. По аналогии с фотонными кристаллами в оптике такие структуры получили название магнитных кристаллов (МК). МК, созданные на основе тонких пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ), могут быть использованы в качестве элементарной базы для разработки различных функциональных устройств спинтроники и магноники [6,7].

В данной работе представлены результаты исследования методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии (BLS) особенностей многомодового распространения МСВ в МК на основе планарных ЖИГ-волноводов с периодическим изменением ширины. На поверхности пленки ЖИГ (толщина пленки $d=10$ мкм, намагниченность насыщения $4\pi M_0=1350$ Гс) методом лазерного скрайбирования был создан 1D магнитный кристалл с периодической последовательностью вырезов прямоугольной формы на его краях и геометрическими размерами показанными на вставке к рисунку 1 а.

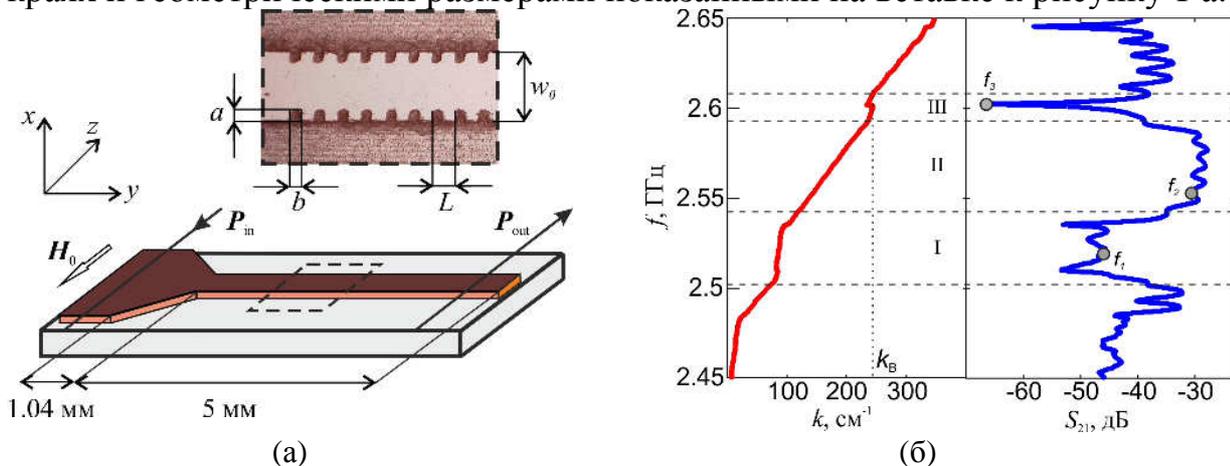


Рис. 1. (а) Нерегулярный волновод с периодически изменяющейся шириной (1D-МК), увеличенный фрагмент 1D-МК с размерами $a=60$ мкм, $b=60$ мкм, $L=122$ мкм, $w_0=353$ мкм; (б)- (левая часть) дисперсионная характеристика МСВ; (б)-(правая часть) амплитудно-частотная характеристика (точками отмечены частоты, где проводились измерения $f_1=2.519$ ГГц, $f_2=2.55$ ГГц, $f_3=2.608$ ГГц).

Для возбуждения магнитостатических волн использовались микрополосковые антенны спиновых волн шириной 30 мкм и длиной 3 мм. Выходная антенна располагалась в узкой части волновода на расстоянии $h=4$ мм от входной. Волновод с МК помещался во внешнее однородное магнитное поле величиной $H_0=444$ Э, ориентированное в плоскости волновода вдоль оси микрополосковых антенн. С помощью векторного анализатора цепей была измерена амплитудно-частотная характеристика (рис. 1 б -правая часть), на ней можно выделить три характерные частотные области с различными уровнями ослабления МСВ. В левой части рис. 1 б представлена дисперсионная характеристика МСВ, которая находилась по измеренной величине фазового набега между микрополосковыми антеннами. Методом BLS было проведено исследование пространственного распределения интенсивности МСВ в МК на различных частотах при импульсных СВЧ-сигналах длительности $\tau=200$ нс, мощностью $P_{in}=-10$ дБмВт и периодом повторения $T_i=1.5$ мкс, подаваемых на вход волновода.

Интенсивность рассеянного света на спиновых волнах определяется выражением $I(y, z, t) \propto |m(y, z, t)|^2$, где $m(y, z, t)$ – амплитуда МСВ [8]. Пространственное распределение спиновых волн в МК характеризуется интегральной

$$I(y, z) = \int_0^{T_i} I(y, z, t) dt.$$

На рисунке 2 представлены пространственные распределения интегральной интенсивности $I(y, z)$ МСВ, измеренные на частотах f_1, f_2, f_3 .

На всех частотах в области МК формируется регулярная пространственная картина распределения интенсивности МСВ за счет суперпозиции падающих и рассеянных на краях МК мод с различными модовыми индексами n . Распределение интенсивности практически симметрично относительно продольной оси МК, т.е. n принимает нечетные значения.

В области I (рис. 1 а) пространственную модуляцию краев волновода нельзя считать малой. В формирование пространственной картины распределения интенсивности существенный вклад вносит межмодовое взаимодействие волн с различными индексами n и их рассеивание на границах волновода. Данные механизмы приводят к быстрому пространственному затуханию МСВ и формированию широкой запрещенной зоны. В области частот II

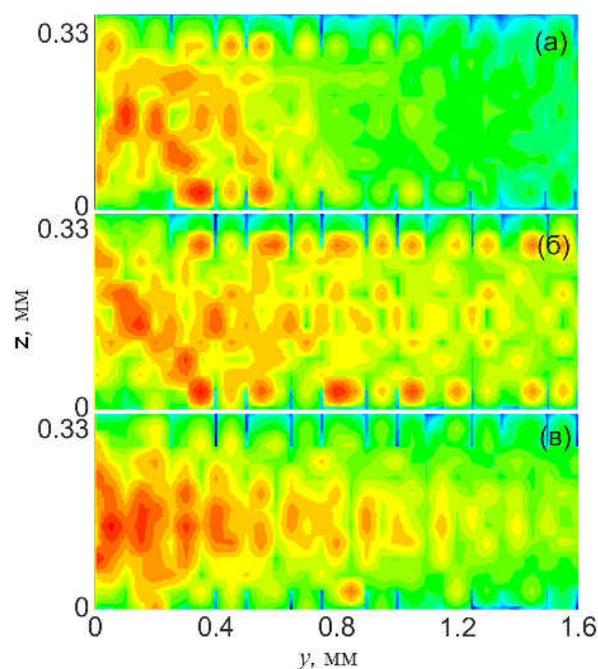


Рис. 2. Пространственное распределение $I(y, z)$ МСВ в МК на различных частотах входного СВЧ-сигнала (а) f_1 , (б) f_2 , (в) f_3 .

(рис. 2 б) реализуется режим распространения МСВ с малым затуханием и многомодовым характером поперечного распределения. В области частот III (рис. 2 в) коэффициент отражения уменьшается, наблюдается перераспределение интенсивности МСВ от краев МК к его продольной оси. Эффективность рассеивания МСВ на периодических краях волновода уменьшается, в процессе распространения волны профиль поперечного распределения интенсивности $I(y,z)$ приближается к распределению вида $\sin^2(\pi z/w_0)$ для фундаментальной моды, и реализуется брэгговская запрещенная зона. Отметим, что с ростом частоты сигнала от f_1 до f_3 происходит трансформация поперечного распределения интенсивности МСВ $I(z)$ в волноводе с изменением числа и положения максимумов относительно продольной оси волновода. Таким образом, были исследованы особенности многомодового распространения МСВ, пространственного распределения интенсивности и характеристики запрещенных зон МСВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-02-00577), Правительства РФ (проект №11.G34.31.0030) и стипендии Президента РФ (СП-1551.2013.5).

Библиографический список

1. *Obry B., Pirro P., Bracher Th., Chumak A., Osten J., Ciubotaru F.* A micro-structured ion-implanted magnonic crystal // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V.102. P. 202403.
2. *Nikitov S.A., Tailhades Ph., Tsai C.S.* Spin waves in periodic magnetic structures - magnonic crystals // *J. Magn. Magn. Mater.* 2001. Vol. 236. P. 320-330.
3. *Chumak A.V., Pirro P., Serga A. A., Kostylev M. P., Stamps R. L., Schultheiss H., et al.* Spin-wave propagation in a microstructured magnonic crystal // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. 262508.
4. *Arikan M., Au Y., Vasile G., Ingvarsson S., Kruglyak V. V.* Broadband injection and scattering of spin waves in lossy width-modulated magnonic crystal waveguides // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. V. 46. P. 135003.
5. *Chumak A.V., Neumann T., Serga A. A., Hillebrands B., Kostylev M. P.* A current-controlled, dynamic magnonic crystal // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009. V. 42, 205005.
6. *Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D.* Magnonics // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010. V. 43. P. 264001.
7. *Krawczyk M., Grundler D.* Review and prospect of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2014. V. 26. P. 123202.
8. *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.

ВЛИЯНИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРИТОВОГО ВОЛНОВОДА КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ

К.В. Бубликов, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: olorin91@mail.ru

Развитие технологий изготовления магнитных микро- и наноразмерных структур приводит к необходимости использования численных методик расчета характеристик распространения спиновых и магнитостатических волн. Миниатюризация волноведущих структур, выполненных на основе пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ), представляется интересной ввиду относительно небольшого затухания по сравнению, например, с пермаллоем. В настоящее время особый интерес представляет исследование слоистых волноведущих структур из ферритового и сегнетоэлектрического слоев [1], т.н. мультиферроиков. Применение мультиферроика в качестве основы для создания волновода позволяет управлять его электродинамическими характеристиками внешним магнитным и электрическим полями, что может найти применение для создания СВЧ фазовращателей, фильтров, линий задержки и резонаторов.

Цель настоящей работы состояла в адаптации методики расчета электродинамических характеристик ферромагнитных структур [2] для исследования собственных мод и дисперсионных характеристик поверхностных магнитостатических волн в ограниченном в поперечном направлении волноводе на основе мультиферроика. В различных работах (например [3]) было проведено детальное исследование распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в волноводе конечной ширины, в работе [4] исследовалось влияние сегнетоэлектрика на ПМСВ в безграничной структуре. В настоящей работе методом конечных элементов изучается влияние сегнетоэлектрического слоя на спектр ПМСВ в ограниченной по ширине структуре. На рис. 1, *a* показано продольное сечение волновода, являющееся расчётной структурой. Верхняя и нижняя границы расчетной области представляют собой идеальный металлический проводник, на левой и правой границе устанавливались граничные условия в виде магнитных стенок. Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси x , его величина варьировалась при решении, плёнка ЖИГ намагничивалась до насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс. Конечно-элементная сетка состояла из элементов треугольной формы характерного размера $70 \mu\text{m}$, в области вокруг ферритовой пленки выполнялось измельчение до размера $15 \mu\text{m}$, т.к. локализация полей вблизи и внутри ЖИГ требует повышенной разрешающей способности численного анализа.

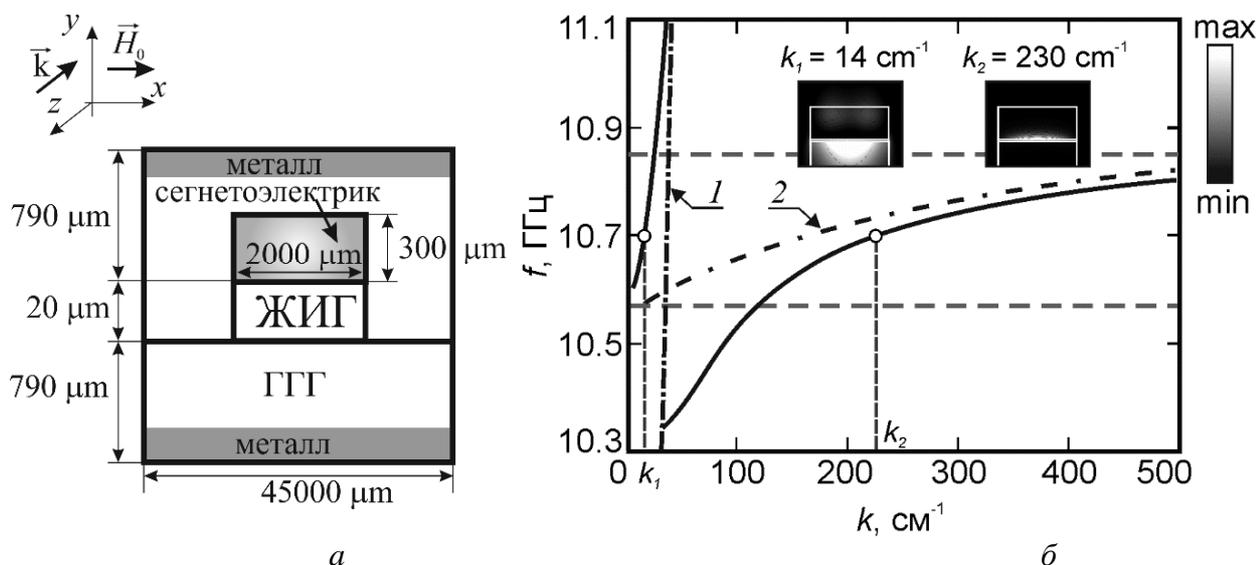


Рис. 1. а) Схема расчетной области и её геометрические размеры. ГГГ – подложка из галлий-гадолиниевого граната.; б) Дисперсионные характеристики слоистой структуры с сегнетоэлектрическим слоем (сплошные кривые) при значении $H_0=3000$ Э. Штрихпунктирными линиями отмечены дисперсионные характеристики первой моды диэлектрического волновода с $\epsilon_{FE}=1000$ (кривая 1) и дисперсионные характеристики первой моды слоистой структуры в случае, когда $\epsilon_{FE}=1$ (кривая 2). На вставках показано распределение $|\vec{E}|$ в центре расчетной области в точках, отмеченных на кривых, для значений волновых чисел $k=14$ см⁻¹ и $k=230$ см⁻¹.

Рассматривается распространение поверхностной магнитостатической волны в волноведущей структуре в направлении оси z . Результат влияния сегнетоэлектрического слоя на дисперсию ПМСВ представлен на Рис. 1 б. Штрихпунктирные линии – дисперсия ПМСВ (1) и дисперсия диэлектрического волновода (2) в случае, когда у сегнетоэлектрика $\epsilon=1$, штриховые линии – граничные частоты ПМСВ. Сплошные линии – результат гибридизации быстрой волны в сегнетоэлектрическом слое и медленной в ферритовом. Результатом является значительная трансформация ПМСВ как по крутизне, так и по полосе пропускания.

Для явления гибридизации необходимо близкое расположение ветвей быстрой и медленной волн, что достигается управлением внешним магнитным полем H_0 (изменяется полоса распространения ПМСВ), внешним электрическим полем (изменяется значение ϵ сегнетоэлектрического слоя), а также конфигурацией волноведущей структуры. При анализе структуры с шириной ЖИГ и ГГГ 200μм не выявлено влияние ϵ на характеристики ПМСВ, т.к. дисперсионные характеристики собственных мод смещаются в область больших волновых чисел и эффективность гибридизации падает. При больших ϵ увеличивается наклон дисперсионных характеристик быстрых волн, что увеличивает область гибридизации и трансформацию дисперсионной кривой ПМСВ до больших значений k . При уменьшении H_0 область существования ПМСВ смещается в нижние частоты и не попадает в область существования быстрой волны, распространяющейся в сегнетоэлектрическом слое,

что уменьшает область гибридизации.

Таким образом, с помощью модификации метода конечных элементов было изучено явление гибридизации быстрой и медленной волн в мультиферроике и изучено влияние размеров волноведущих структур, диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектрического слоя и величины внешнего магнитного поля H_0 на результат этого явления. Требуется дальнейшее изучение модового состава и его трансформация при наблюдении гибридизации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (13-07-12409, 14-02-00976, 14-07-00273, 14-07-92603).

Библиографический список

1. *U. Ozgur, Y. Alivov, H. Morkoc* Microwave ferrites, part 2: passive components and electrical tuning // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2009. V. 20. №10. P. 911-952.g
2. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* // *Известия ВУЗ. ПНД.* 2012. Т. 20, №. 1. С. 143.
3. *Vasil`ev I.V., Kovalev S.I.* Electrodynamics theory of finite magnetostatic waveguides // *IEEE Trans. On MTT.* 1994. V. 42. №7. P.1238-1245.
4. *В.Е.Демидов, Б.А.Калиникос* Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл- сегнетоэлектрик-ферромагнетик- сегнетоэлектрик- металл // *ПЖТФ.* 2000. Т. 26, №7. С. 8-17.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ В РЕЗОНАТОРЕ БЛИЖНЕПОЛЕВОГО СВЧ – МИКРОСКОПА

Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: fadey24@mail.ru

При разработке устройств твердотельной микроэлектроники необходимо контролировать наличие и расположение дефектов в используемых при их создании материалах. Такие возможности появляются при использовании ближнеполевой СВЧ микроскопии [1]. Целью настоящей работы было теоретическое и экспериментальное исследование одного из типов низкоразмерных СВЧ резонаторов [2-7], используемых в ближнеполевой микроскопии: металлический штырь с зазором – короткозамыкающий поршень с выемкой [8].

Данные по распределению поля позволяют разместить зонд СВЧ ближнеполевого микроскопа в области максимальной локализации поля. В настоящее время при расчете устройств СВЧ широко применяются различные численные методы, среди которых наиболее часто используются метод конечных элементов и метод конечных разностей. Во многом схож с ними метод импедансного аналога электромагнитного пространства (ИАЭП) [9].

Метод ИАЭП в отличие от метода конечных элементов, основывается на построении эквивалентной схемы устройства, пространство низкоразмерного резонатора при этом разбивается на кубические элементы, каждой грани которых приводится в соответствие эквивалентная схема пары отрезков ли-

ний передачи, причем эквивалентные схемы граней связаны посредством балансного трансформатора в центре кубического элемента. Все кубические элементы соединяются в единую сетку, образуя тем самым эквивалентную схему устройства.

Нами показана возможность применения метода ИАЭП к расчету полей в низкоразмерной системе (рис.1) из штыря с зазором (1) и близко расположенного короткозамыкателя (2) с выемкой прямоугольной формы (3).

Вычислительный алгоритм был реализован в программной среде Delphi 7. Расчет производился для волновода сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ и частоты 8 ГГц. Схематическое изображение описываемой конструкции приведено на рис. 1. При моделировании ширина штыря составляла 2 мм, толщина – 0,5 мм.

Было численно исследовано распределение поля при наличии штыря и прямоугольной выемки в короткозамыкателе (рис. 2). Штырь располагался на расстоянии $a=10,5 \text{ мм}$ от узкой стенки волновода и $b=3 \text{ мм}$ от короткозамыкателя, его длина при этом составляла $e=7 \text{ мм}$. Выемка располагалась симметрично относительно оси волновода и имела ширину $c=2 \text{ мм}$ и глубину $d=2 \text{ мм}$.

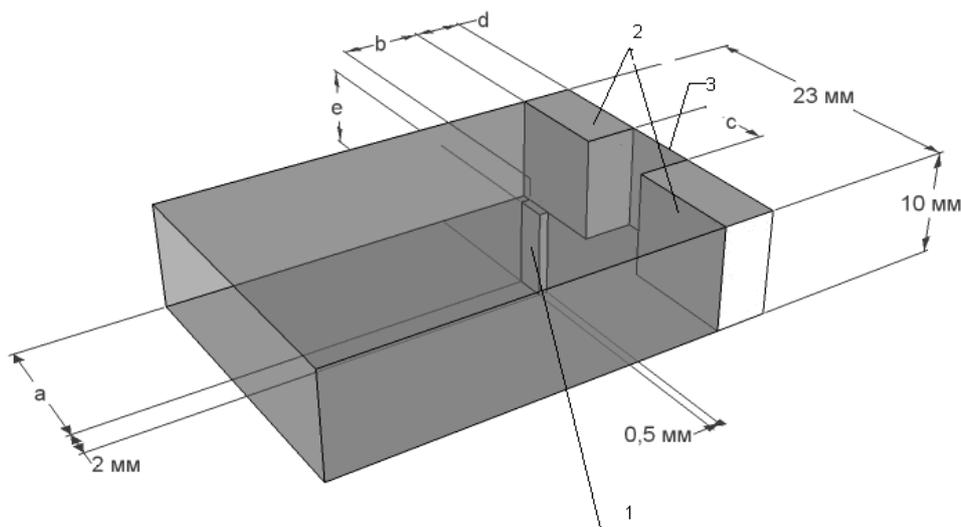


Рис. 1. Схема низкоразмерной системы из штыря и близко расположенного короткозамыкателя с выемкой прямоугольной формы

Данные расчета, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что электрическое поле в низкоразмерном резонаторе локализуется в области выемки.

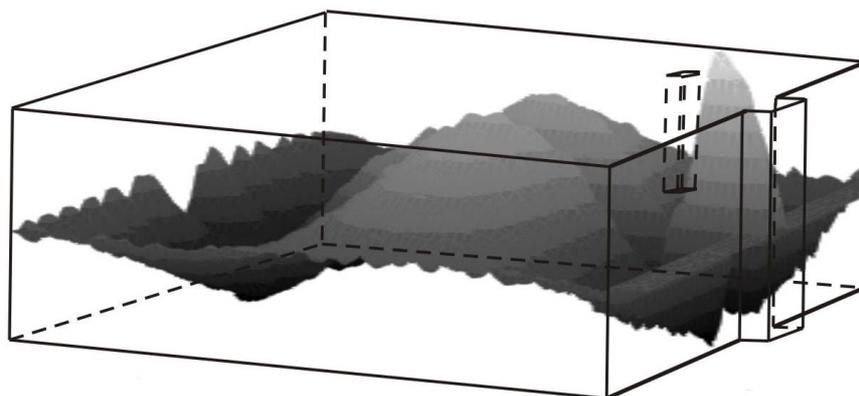


Рис. 2. Трехмерное представление распределения поля в волноводе при наличии выемки.
 $a=10,5$ мм, $b=3$ мм, $e=7$ мм, $c=2$ мм, $d=2$ мм

Было проведено экспериментальное определение распределения поля в поперечном сечении волновода. На рис.3 приведено сравнение результатов теоретического расчета (штриховая кривая) с экспериментальными значениями (сплошная кривая) распределения СВЧ поля в поперечном сечении волновода на расстоянии 2 мм от короткозамыкателя при наличии штыря и выемки. Размещение элемента связи с зондом ближнеполевого микроскопа в окрестности локализации поля в резонаторе открывает возможность повышения его чувствительности к возмущающему воздействию, вносимого измеряемым объектом.

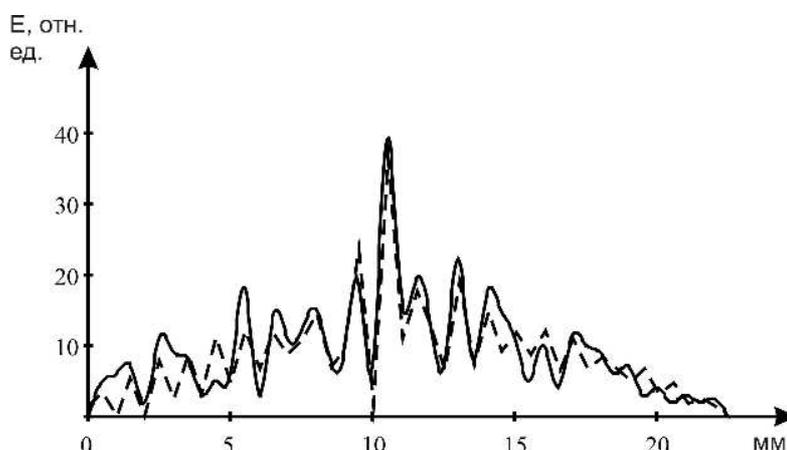


Рис. 3. Распределение СВЧ поля в поперечном сечении резонатора (сплошная кривая – расчет, штриховая кривая – эксперимент)

Из вида распределения поля, приведенного на рис.3, следует, что оно представляет собой результат трансформации поля волны H_{10} в совокупность высших нераспространяющихся типов волн, локализованную в ограниченном объеме. Именно нераспространяющиеся типы волн образуют зондирующее поле в ближнеполевым СВЧ микроскопе. Поэтому вывод через элемент связи такого поля в резонаторе к зонду микроскопа лучше соответствует требованию к формированию на конце зонда ближнего поля. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом.

Библиографический список

1. Усанов Д.А. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. 100 с.
2. Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahacos C. P., Wellstood F. C. Near-Field Microwave Microscopy of Materials Properties, in Microwave Superconductivity. – Amsterdam: Kluwer, 2001. P. 239.
3. Пат. № 2373545 РФ МПК G01R27/26. Устройство для измерения параметров материалов / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, А.Н.Сорокин, В.Ю.Кваско. Опубл. 20.11.09. Бюл. № 32.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системах диафрагма-короткозамыкающий поршень // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2001. Т.4. №3. С.13-20.
5. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системе диафрагма-короткозамыкающий поршень// Изв. вузов Радиофизика. 2001. Т. 44. №12. С. 1046–1049.
6. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Электрически управляемый СВЧ-резонатор // ПТЭ. 2006. № 3. С.100-102.
7. Управляемый магнитным полем СВЧ – выключатель на р-і-п диодах / Д.А. Усанов, С.С.Горбатов // ПТЭ. 2003. №1. С.72-73.
8. Усанов Д. А., Горбатов С. С. Резонансы в волноводной системе "штырь с зазором – близкорасположенный поршень" // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49. № 2. С.27–33.
9. С. А. Иванов, Б. В. Сестрорецкий, А. Н. Боголюбов. Метод импедансного аналога электромагнитного пространства для решения начально-краевых задач электродинамики // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9. С. 274-304.

СУБГАРМОНИЧЕСКИЕ СМЕСИТЕЛИ НА ДИОДАХ ШОТКИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

А.В. Бычок¹, А.В. Зоренко², Я.Я. Кудрик³, В.В.Шинкаренко³

¹ГП НИИ «Орион», г. Киев, Украина

²Киевский университет имени Тараса Шевченка, Украина

³Институт физики полупроводников им. В.Е.Лашкарева НАНУ, Украина

E-mail: andrey.bychok.90@mail.ru, ndiorion@tsua.net

В настоящее время наблюдается тенденция интенсивного освоения субмиллиметрового диапазона длин волн для интроскопии неметаллических объектов в системах контроля безопасности, устройств радиолокационных измерений, медицинских систем томографии и терапии. Актуальной является задача создания приемников волн в этих диапазонах [1-3]. По своей сути это гетеродинные приемники, важнейшими элементами которых являются преобразователи частоты.

Преобразователь частоты представляет собой устройство для переноса спектра сигнала в другую область частот с сохранением закона модуляции. Поэтому в преобразователе используется нелинейный элемент и местный гетеродин, обеспечивающий режим работы преобразующего прибора. В качестве нелинейного элемента в преобразователях целесообразно использовать полупроводниковые диоды с барьером Шоттки (ДБШ), крутизна вольтам-

перной характеристики которых изменяется под действием относительно большого сигнала гетеродина U_H и практически остается постоянной под действием слабого принимаемого сигнала U_c ($U_c \ll U_H$). Посредством воздействия на крутизну ВАХ диода в составе смесителя получается эффект умножения. Важными требованиями являются стабильность частоты гетеродина и его уровень мощности. Поскольку задача создания высокостабильного гетеродина с частотами выше 200 ГГц и необходимым уровнем мощности, достаточно сложна, можно воспользоваться свойством смесителя работать на частоте гетеродина в два раза ниже принимаемого полезного сигнала. В диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн промежуточная частота может образовываться не только первыми гармониками, но и гармониками более высоких порядков. В результате в приемнике образуются дополнительные каналы приема.

Обычно в смесителе уровень продуктов преобразования третьего порядка выше, чем уровень продуктов преобразования второго порядка, однако этот канал приема отстоит от полезного сигнала дальше (на $2/3f_{пч}$), а, следовательно, его легче можно подавлять при помощи полосового фильтра преселектора, настроенного на частоту рабочего канала.

При проектировании смесителя количество учитываемых гармоник сигнала и гетеродина зависит от вида вольтамперной характеристики нелинейного элемента и формы сигнала гетеродина. Наименьшим количеством гармоник, а, следовательно, и наименьшим количеством побочных каналов обладают смесители, построенные на нелинейных элементах с квадратичными вольтамперными характеристиками.

Для используемых диодов с различной емкостью были измерены вольтфарадные характеристики (рис. 1) и вольтамперные характеристики на прямой ветви (рис. 2).

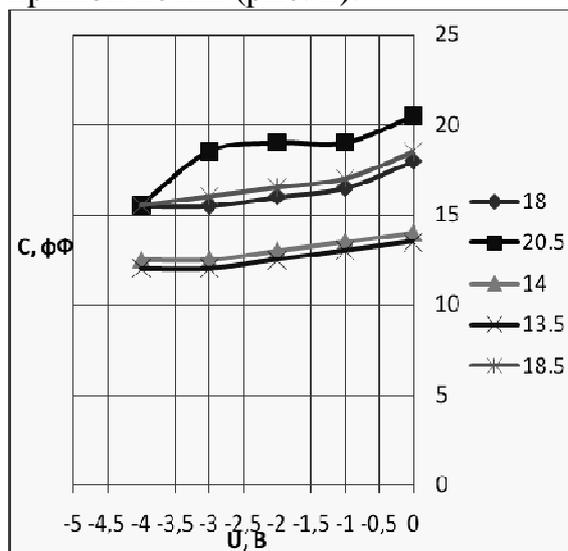


Рис. 1. Вольтфарадные характеристики ДБШ с различными емкостями C_{jo} контакта металл – полупроводник (на графике отображены справа в фемтофарадах).

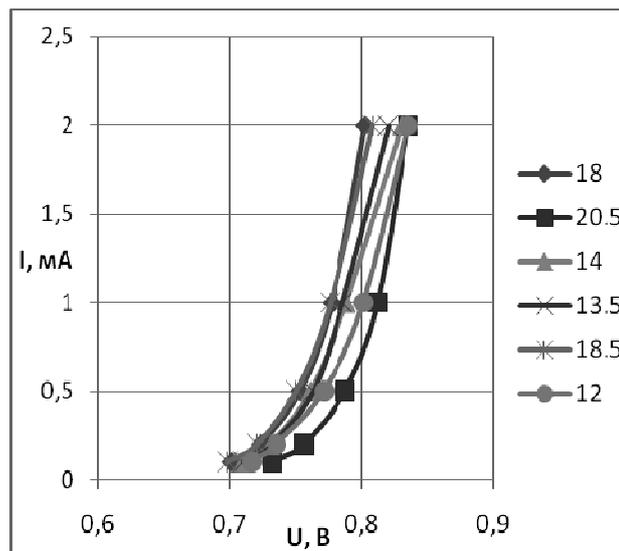


Рис. 2. Вольтамперные характеристики ДБШ с различными емкостями C_{jo} контакта металл – полупроводник (на графике отображены справа в фемтофарадах).

На рис.1. показано, что в ДБШ для смесителей, в отличие от умножительных диодов, вольтфарадные характеристики представляют практически прямую линию. Токи утечки не превышают 1нА. Математическое моделирование ДБШ осуществлялось с помощью SPICE-модели [4, 5], по параметрам из табл. 1.

Таблица 1

| Параметр | Единицы измерения | Значение |
|---|-------------------|----------|
| Ток насыщения, I_s | фА | 90 |
| Сопротивление пассивной области, R_s | Ом | 7 |
| Фактор неидеальности, N | | 1,1 |
| Емкость контакта, C_{j0} | фФ | 19,5 |
| Контактная разность потенциалов, V_j | В | 0,26 |
| Коэффициент, учитывающий плавность перехода, M | | 0,05 |
| Коэффициент утечки емкости при прямом смещении, F_c | | 0,5 |
| Напряжение обратного пробоя, B_v | В | 4 |
| Начальный ток пробоя, I_{Bv} | нА | 1 |
| Температурный коэффициент тока насыщения, X_{T1} | | 2 |
| Ширина запрещенной зоны, E_g | еВ | 1,42 |

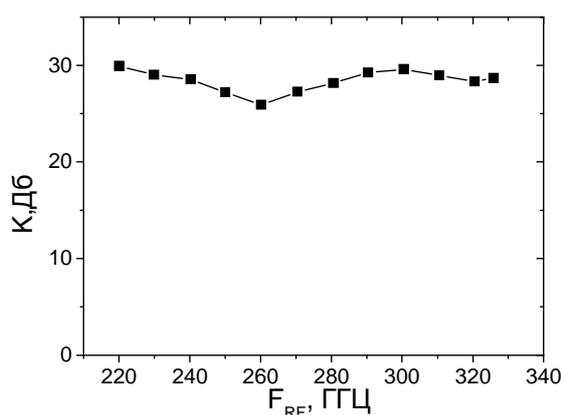


Рис. 3. Зависимость потерь преобразования (К) субгармонического смесителя от радиочастоты (F_{RF}).

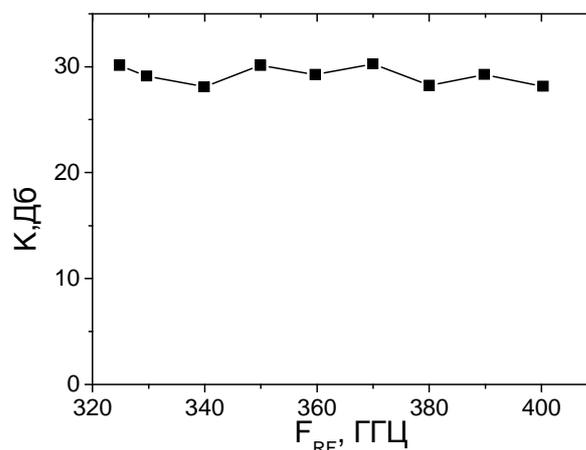


Рис. 4. Зависимость потерь преобразования (К) субгармонического смесителя от радиочастоты (F_{RF}).

На основе математического моделирования работы диода и трехмерного численного моделирования электромагнитного поля в смесителе разработаны экспериментальные образцы смесителей в диапазонах частот 220 – 325 и 325-400 ГГц.

Исследованы электрические параметры субгармонических смесителей при нормальных климатических условиях (рис. 3, 4). Исследования показали, что в диапазоне рабочих частот смесителя потери преобразования лучше 30 дБ на частоте ПЧ 3 ГГц.

Библиографический список

1. *Kleiner R.* Filling the Terahertz Gap // *Science*, 2007.—V. 318, №.5854.—pp. 1254-1255

2. *Гроо Е. П., Игнатьев М. Г., Козлова Л. А., Петрова Т. С.* Технологические аспекты смесительного диода с барьером Шоттки на GaAs СВЧ диапазона. 7-я Всероссийская с Международным Участием Научно-Техническая Конференция «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярский Государственный Технический Университет. 5-6 мая 2005.
3. *Розанов Б.А., Розанов С.Б.* Приемники миллиметровых волн. – М.: Радио и связь, 1989.
4. *Белкин М. Е., Белкин Л. М.* Особенности построения резистивных смесителей диапазона на крайне высоких частот в монолитном исполнении. ФГУП «НПП «Пульсар»: Электронная техника, журнал «Полупроводниковые приборы», 2010.
5. *R.O. Osaaya.* A current–voltage–temperature method for fast extraction of schottky diode static parameters // Measurement, V. 49. P. 246-255.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЛАТЕРАЛЬНО СВЯЗАННЫХ ЖИГ-ВОЛНОВОДАХ КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ В ПРИСУТСТВИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА

К.В. Бирюков, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: kikprog@gmail.com

Связанные планарные ферритовые волноводы на основе тонких пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) представляют интерес благодаря возможности управления характеристиками распространения в них волн различных типов (поверхностных и объемных), наличием различных линейных и нелинейных явлений (в том числе солитонных режимов распространения) [1]. В настоящей работе рассматриваются структуры, состоящие из латерально связанных ЖИГ-волноводов, которые могут быть использованы в качестве базовых элементов для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, фильтров, ответвителей [2].

Изображенная на рис. 1, (а) структура представляет собой два связанных ЖИГ-волновода на подложке из галлий-гадолиниевого (ГГГ) граната. Размер волноводов указан на рисунке в микронах. Расстояние между волноводами d . Ширина каждого волновода $a=200$ мкм, толщина пленок $c=20$ мкм, толщина подложки из ГГГ $e=100$ мкм, общая ширина $f=2*a+d$ мкм. Рассматривается распространение поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) в пленке в направлении оси z . Внешнее магнитное поле H_0 направлено вдоль положительного направления оси x и составляет 300 Э.

Для численного моделирования использовался метод конечных элементов [3]. Результат расчета дисперсионных кривых для первых трех симметричных и асимметричных ширинных мод рассматриваемой структуры приведен на рис. 1, б. Результаты расчета компонент E_x , H_z для симметричных и асимметричных мод при значении частоты f приведены на рис. 2. На рис. 1, б кружками отмечены точки на дисперсионных кривых, для которых приведены распределения модулей напряженности электрического и магнитного полей на рис 2. Проведено экспериментальное исследование пространственных

характеристик распространения ПМСВ в рассматриваемой структуре методом бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов [4] в конфигурации обратного рассеяния.

Таким образом, было проведено численное моделирование и экспериментальное исследование динамики распространения волн в системе двух ограниченных в поперечном направлении ЖИГ-волноводов, латерально связанных между собой. Построены дисперсионные характеристики, исследовано распределение полей собственных мод ПМСВ, рассмотрено влияние изменения расстояния между волноводами на электродинамические характеристики структуры с учётом многомодовости состава излучения, распространяющегося вдоль структуры.

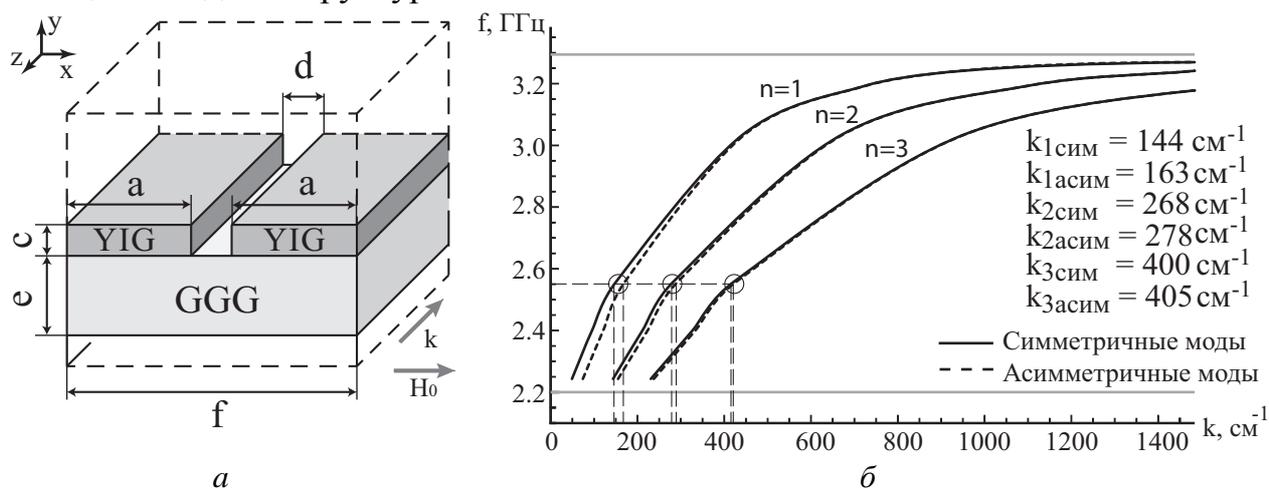


Рис. 1. а) Геометрия расчетной области; б) рассчитанные дисперсионные характеристики для трех первых мод ЖИГ волновода. Кружками отмечены точки, для которых приведено распределение модулей напряженности электрического и магнитного полей на рис. 2

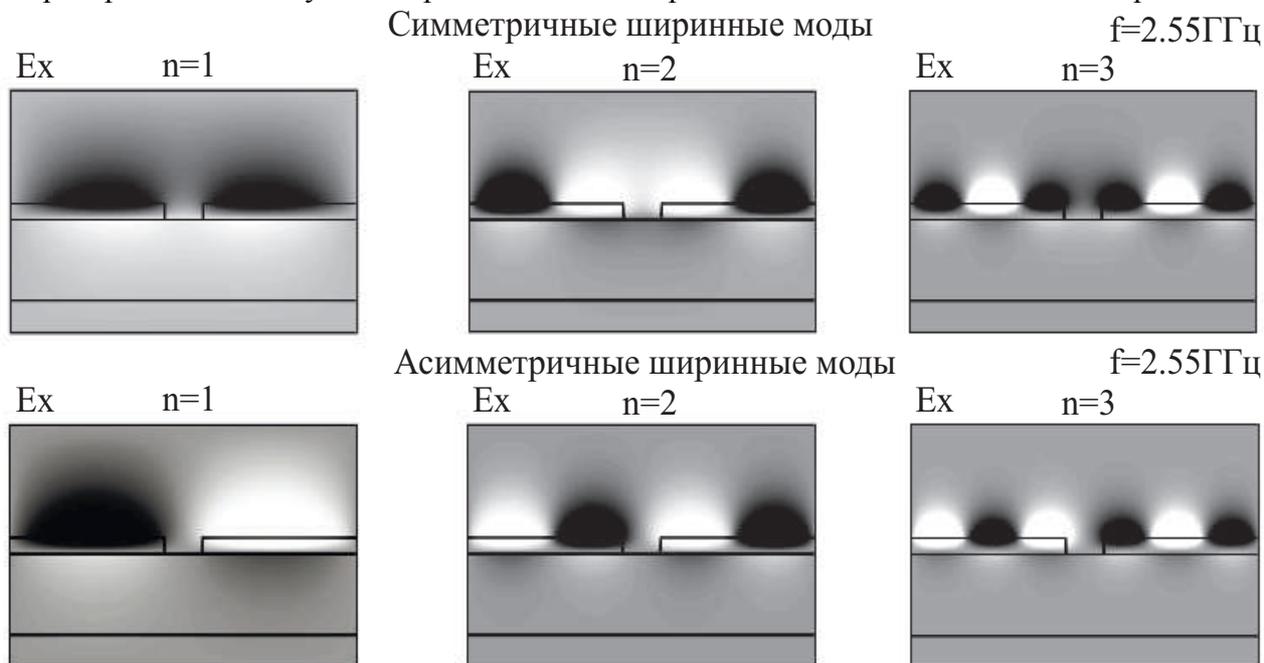


Рис. 2. Распределение E_x для первых трех симметричных и асимметричных мод

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (12-07-31009, 13-02-00732), правительства РФ (№ 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. *Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B.* YIG magnonics //J. Phys. D:Appl.Phys. 2010. V. 43. 264002.
2. *Lenk B., Ulrichs H., Garbs F., Munzenberg M.* The building blocks of magnonics// Phys. Rep. 2011. V. 507. P. 107-136.
3. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* Моделирование распространения магнитостатических волн в одномерных маггонных кристаллах // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, №. 1. С. 143–159.
4. *Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N.* Brillouin light scattering studies of confined spin waves: linear and nonlinear confinement// Phys. Rep. 2001. Vol. 348. P. 441-489.

3. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ СВЧ МИКРОСКОПИЯ

Д.А. Усанов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Эффективность производства существующих и успешное создание новых приборов микро-, нано- и СВЧ-электроники во многом зависит от уровня развития технологии изготовления слоёв композитных материалов и метаматериалов, толщиной от нескольких нанометров до десятков микрометров и структур на их основе, нанесенных на полупроводниковые и диэлектрические подложки. В процессе создания структур твердотельной микро- и наноэлектроники немаловажную роль имеют операции контроля. Одним из способов такого контроля является ближнеполевая СВЧ-сканирующая микроскопия. Этот вид микроскопии имеет ряд преимуществ, среди которых – отсутствие квантовых эффектов поглощения излучения веществом исследуемого объекта, прозрачность в СВЧ-диапазоне многих оптически непрозрачных веществ. Данный вид микроскопии особенно предпочтителен при отладке технологии производства микроэлектронных устройств, предназначенных для использования именно в СВЧ-диапазоне, так как параметры материалов и структур измеряются на тех же частотах, на которых они будут использованы [1]. Таким образом, если даже СВЧ-ближнеполевая микроскопия и не заменяет других видов контроля и исследования, то как минимум гармонично их дополняет. Результаты измерений с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа могут быть успешно использованы при изучении сверхпроводимости, эффектов, связанных с распространением спиновых волн, плазмонов, эффекта Джозефсона и т.д. Высокое разрешение ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов позволяет локализовать области дефектов в интегральной схеме. Ближнеполевая СВЧ микроскопия привела к возможности постановки нового класса электродинамических экспериментов по исследованию материалов. Свободные от ограничений традиционной микроволновой техники такие эксперименты могут проводиться при высо-

ком пространственном разрешении в широком частотном диапазоне. Кроме того, измерения могут быть выполнены количественно, и таким образом, оказывается возможным создание картин микроволновых свойств материалов.

В приложении к задачам подповерхностного зондирования диапазон СВЧ обладает несомненным преимуществом перед оптическими и инфракрасными волнами благодаря сравнительно высокой проникающей способности микроволн внутрь многих сред.

Использование в ближнеполевом сканирующем СВЧ-микроскопе в качестве высокоселективной системы СВЧ фотонного кристалла наряду с высокой локальностью измерений позволяет повысить его чувствительность при измерении слоев с толщинами в единицы нанометров и с малыми значениями диэлектрической проницаемости.

Основным элементом ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающим в большей мере его высокую чувствительность и разрешающую способность, авторы [1] назвали связанный с зондом СВЧ-резонатор. По изменению характеристик резонатора (резонансной частоты и добротности) в процессе сканирования исследуемого образца можно судить о его топологии и изменении свойств материала подложки от точки к точке.

В работе [2] показана возможность создания СВЧ-резонаторов на основе так называемых низкоразмерных резонансных систем и обнаружена их высокая чувствительность к возмущающим воздействиям. Резонансы в таких системах объяснены возбуждением в них высших типов колебаний. Так как один из размеров такого рода резонаторов намного меньше длины волны основного типа, они были названы "низкоразмерными" [3]. Вносимое в низкоразмерный резонатор малое возмущение, изменяющее его электрическую длину, приводит к значительному изменению его характеристик, что и демонстрировалось в работах [2, 3].

В работе [4] была показана возможность создания СВЧ-резонаторов на основе систем «штырь с зазором — близко расположенный короткозамыкатель» и обнаружена их высокая чувствительность к возмущающим воздействиям.

В рассмотренной авторами статьи [5] конструкции резонатором являлась система близко расположенных индуктивной и емкостной диафрагм. Авторами [5] для иллюстрации возможностей описанного микроскопа выбрана использующаяся в акустических линиях задержки и фильтрах на поверхностных акустических волнах структура из ниобата лития с нанесенной на него металлизацией в виде встречно-штыревой алюминиевой системы с периодом 0,5 мкм, фотоизображение которой приведено на рис. 1. Зонд устанавливался на расстоянии 2 мкм от исследуемой структуры.

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость потерь L , соответствующих пику резонанса, от смещения измерительного зонда вдоль оси x . При смещении зонда глубина резонанса изменялась, что позволило судить о разрешении металлических элементов исследуемой структуры с шириной около 0,5 мкм.

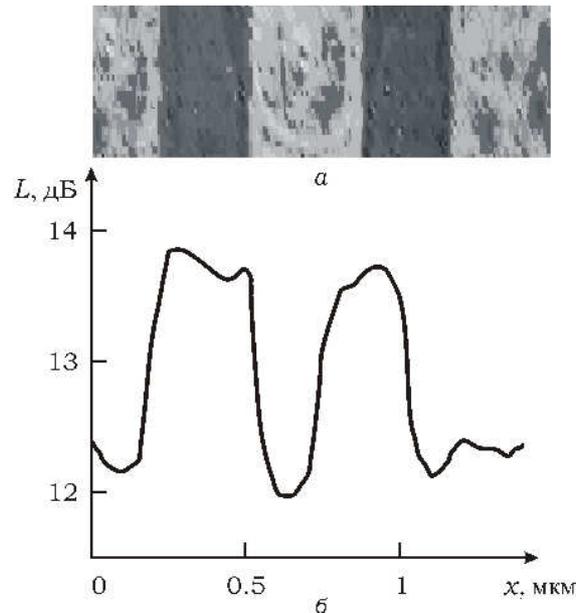


Рис.1 Структура из ниобата лития с нанесенной металлизацией

При непосредственном подключении зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа к СВЧ-генератору без использования элементов развязки может быть создана автодинная система, в которой реализуется, так называемый, эффект автодинного детектирования, при котором активный элемент СВЧ-генератора является одновременно источником и приёмником отражённой электромагнитной волны [6].

Применение эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ-генераторах для контроля параметров материалов основано на установлении зависимостей величины протектированного сигнала от параметров контролируемых слоев, например, толщины, диэлектрической проницаемости, электропроводности [7–9].

Если поверхность образца обладает рельефом, или образец является неоднородным по своим электрофизическим характеристикам (электропроводность, диэлектрическая проницаемость), то при перемещении зонда вдоль поверхности образца изменяется амплитуда и фаза отражённой электромагнитной волны и тем самым изменяется величина сигнала, фиксируемого детекторным диодом. При сканировании исследуемого образца сигнал с детекторного диода через АЦП передавался в компьютер, где с помощью специального программного обеспечения с учётом величины сигналов, управляющих линейными трансляторами, формировался трёхмерный массив данных, позволяющий получить графическое представление свойств исследуемого образца.

На рис. 2 приведены результаты визуализации поверхности керамической пластины с изображением юбилейного знака Саратовского государственного университета с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа.



Рис. 2. Результаты визуализации поверхности керамической пластины с изображением юбилейного знака СГУ



Рис. 3. Фотография пластины с юбилейным знаком СГУ, фрагмент которого покрыт слоем графита

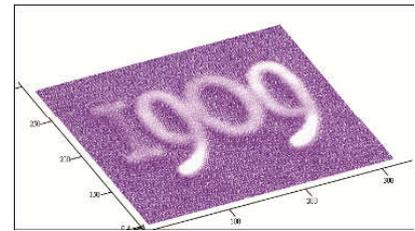


Рис. 4. Результаты визуализации фрагмента юбилейного знака, покрытого слоем графита

Для демонстрации возможности применения ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна к задачам подповерхностного зондирования была использована керамическая пластины с изображением юбилейного знака Саратовского государственного университета, покрытым слоем графита толщиной 0,8 мкм и удельной электропроводностью $10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Фотография пластины с юбилейным знаком Саратовского государственного университета, фрагмент которого покрыт слоем графита, приведена на рис. 3.

На рис. 4 приведены результаты визуализации фрагмента юбилейного знака, покрытого слоем графита, с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Шаг сканирования составлял 2,0 мкм по обоим направлениям в плоскости образца.

Как следует из результатов, представленных на рис. 3 и рис. 4, трудно-разрешимая в оптическом диапазоне длин волн задача подповерхностного зондирования может быть успешно решена с использованием метода ближнеполевой СВЧ-микроскопии.

Таким образом, показана возможность использования в качестве зонда в ближнеполевых СВЧ-микроскопах для повышения чувствительности и разрешающей способности низкоразмерных СВЧ-резонаторов на основе систем «штырь с зазором — близко расположенный короткозамыкатель» и системы «индуктивная диафрагма — емкостная диафрагма». Приведено описание ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна. Продемонстрирована возможность визуализировать с высоким пространственным разрешением рельеф и электрофизические свойства поверхности керамической пластины с нанесённым нанометровым слоем металла, как в режиме прямого доступа к объекту сканирования, так и в режиме подповерхностного зондирования.

СВЧ-микроскоп был использован для измерения распределения поля и концентрации носителей заряда в диодах Ганна (см. рис. 5, 6). В результате была установлена возможность существования в таких диодах стационарного многодоменного режима, что позволяет по-новому объяснить физику их работы.

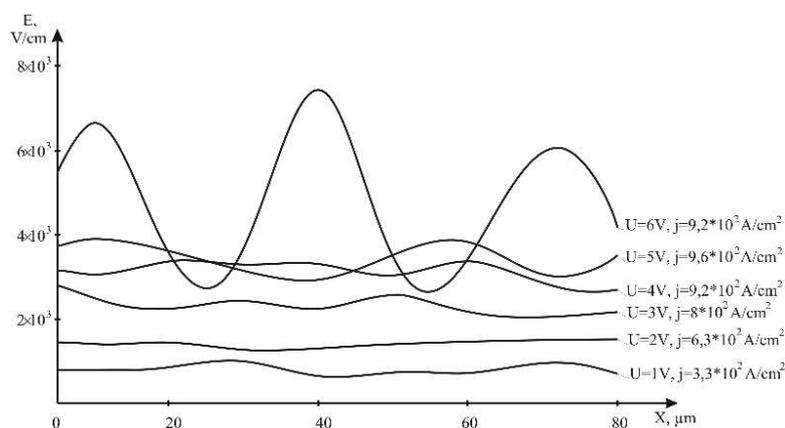


Рис. 5. Профили распределения напряженности электрического поля вдоль кристалла диода Ганна.

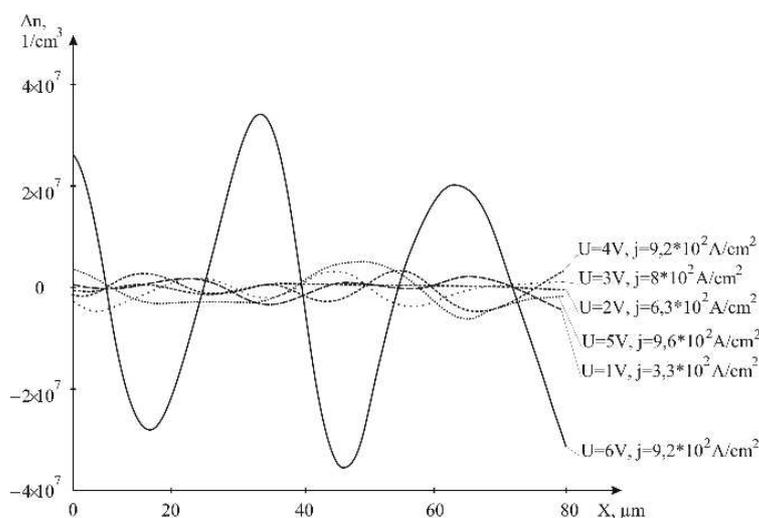


Рис. 6. Профили распределения неравновесной компоненты концентрации Δn вдоль кристалла диода Ганна

При использовании ближнеполевых СВЧ-микроскопов возникает необходимость в наличии калибровочных образцов. Так, например, для СВЧ-толщиномеров использовались эталонные образцы, полученные с применением рентгеновских методов.

Новые возможности в создании эталонов открываются при использовании периодических структур, называемых фотонными кристаллами. Эти возможности связаны с тем, что если эталонируемый образец нарушает периодичность фотонного кристалла, то в характерной для фотонного кристалла запрещенной полосе частот наблюдается резонансное пропускание—примесная мода. С использованием теоретического описания и данных измерений в результате решения обратной задачи возможно определение искомым характеристик эталонного образца.

Отметим, что резонансная особенность, характерная для примесной моды, отличается высокой селективностью. Это позволяет использовать фотонный кристалл с примесной модой в качестве элемента, повышающего чувствительность ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа, что было продемонстрировано экспериментально [10]. Схематическое изображение такой конструкции приведено на рис. 7.

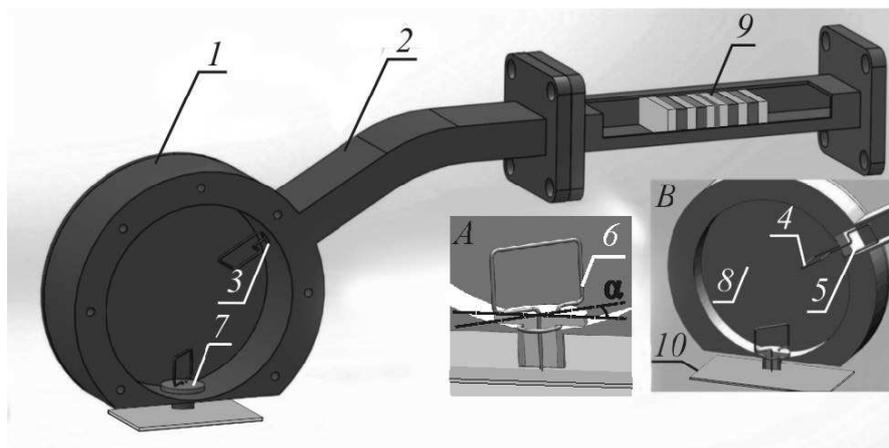


Рис. 7. Зонд ближнеполевой СВЧ-микроскопа на основе цилиндрического СВЧ-резонатора с рамочным элементом связи и одномерным фотонным кристаллом. 1–цилиндрический резонатор, 2–волновод, 3– мембрана, 4, 6–рамочные элементы связи, 5–диэлектрическая вставка, 7–штулка, 8–крышки резонатора, 9–фотонный кристалл. Вставка А. Рамочный элемент связи. Вставка В. Цилиндрический СВЧ-резонатор с рамочным элементом связи и измеряемым образцом 10.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946), Правительства Российской Федерации (грант государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahacos C. P. and Wellstood F. C. Near-field microwave microscopy of materials properties // Microwave Superconductivity. Eds. H. Weinstock and M. Nisenoff. Amsterdam. The Netherlands: Kluwer. 2001. P. 239–269.
2. Резонансы в полубесконечном волноводе с диафрагмой, связанные с возбуждением волн высших типов / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, С. Б. Вениг, В. Е. Орлов // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 18. С.47–49.
3. Усанов Д. А., Горбатов С. С. Резонансы в волноводной системе "штырь с зазором – близкорасположенный поршень // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49. № 2. С.27–33.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системах диафрагма — короткозамыкающий поршень // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2001. Т. 4. № 3. С. 13–20.
5. Усанов Д. А., Горбатов С. С., Кваско В. Ю. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с низко-размерным резонатором типа "индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма" // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2010. №6. С. 66-69
6. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. // Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 2003. С.312.
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. // Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1999. С.376.
8. Усанов Д. А., Коротин Б. Н. Устройство для измерения толщины металлических пленок, нанесенных на диэлектрическую основу // ПТЭ. 1985. № 1. С.254
9. Усанов Д.А., Тупикин В.Д., Скрипаль А.В., Коротин Б.Н. Использование эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ генераторах для создания устройств радиоволнового контроля// Дефектоскопия. 1995. №5. С.16–20.

10. Усанов Д.А., Никитов С.А. Скрипаль А.В., Фролов А.П. Ближнеполевой сверхвысоко-частотный микроскоп на основе фотонного кристалла с резонатором и регулируемым элементом связи в качестве зонда// Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 12. С. 1071–1078.

ТУННЕЛЬНЫЙ ФОТОЭФФЕКТ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Г.Г. Акчурин^{1,2}, А.Н. Якунин², Н.П. Абаньшин³, Б.И. Горфинкель³,
Г.Г. Акчурин, мл.^{1,2}

¹Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского

²Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

³ООО «Волга-Свет», г. Саратов

E-mail: Акчурингг@mail.ru

Исследован туннельный фотоэффект в микродиоде с локализацией электростатического поля на эмиттере углеродной наноразмерной структуры. Экспериментально обнаружена возможность управления «красной границей» внешнего фотоэффекта при облучении углеродного эмиттера лазерными и светодиодными пучками фотонов с низкой энергией (существенно меньше работы выхода) в спектральном диапазоне от ближнего УФ (380 nm) до ближнего ИК (1550 nm) микро- и милливаттной оптической мощности. Установлена возможность инициирования туннельного фототока за счет управления напряженностью поля в зазоре «эмиттер-анод». Использование модифицированного уравнения Фаулера-Нордгейма для описания неравновесных фотоэлектронов позволяет интерпретировать наблюдаемое явление. Обсуждаются особенности построения и создания сверхширокополосных и сверхбыстродействующих фотодетекторов на основе туннельного фотоэффекта с управляемой красной границей.

Из классического уравнения Эйнштейна для внешнего ФЭ в металлических образцах следует, что при энергии фотона $h\nu$, большей или равной разности между вакуумным энергетическим уровнем E_0 и уровнем Ферми E_F , с вероятностью, равной единице, происходит туннелирование электрона в вакуум. При этом пороговая длина волны света, определяющая красную границу существования ФЭ, равна λ_b (nm) = $1240/\varphi$ (eV), где $\varphi = E_0 - E_F$ является работой выхода. Тогда для углерода с работой выхода 5 eV получаем, что для возникновения классического ФЭ пороговая длина волны света должна быть меньшей или равной $\lambda_b = 248$ nm, что соответствует дальнему УФ диапазону.

Проведенные нами исследования позволяют утверждать, что в случае формирования сильного электростатического поля в межэлектродном промежутке «эмиттер-анод» наблюдается туннельный ФЭ при энергиях фотонов, существенно меньших работы выхода электрона из эмиттера.

Данные результаты не противоречат выражению для вероятности туннелирования после соответствующей модификации квантово-механической модели автоэлектронной эмиссии Фаулера-Нордгейма [1]. С целью установления физического механизма обнаруженного туннельного ФЭ в сильных электростатических полях в данной модели необходимо ввести коррективы по учету деформации потенциального барьера, обусловленной влиянием эффекта Шоттки, в расчет вероятности туннелирования неравновесных фотоэлектронов, возникающих при поглощении фотонов с энергией $h\nu$. Использование предложенной модели для оценки влияния сильных электростатических полей напряженностью 10^7 - 10^8 V/cm показало, что высотой и шириной потенциального барьера можно управлять, уменьшая их в несколько раз с повышением напряженности поля.

В случае однофотонного процесса при поглощении равновесными электронами эмиттера с граничной энергией Ферми E_F в поверхностной области, непрерывно облучаемой оптическим пучком с длиной волны $\lambda=c/\nu$, возникают неравновесные электроны, энергия которых возрастает на величину $h\nu$, и это пространственно-локальное энергетическое распределение характеризуется квазиуровнем Ферми E_{Fn} . Вероятность туннелирования неравновесных фотоэлектронов и соответствующее значение плотности тока фотоэмиссии J определяются из модифицированного соотношения Фаулера-Нордгейма [2]:

$$J = \frac{e^3}{8\pi h t^2(y)} \frac{(\beta U)^2}{\Delta Z^2 (\varphi - h\nu)} \exp\left(-\frac{8\pi (2m)^{1/2} (\varphi - h\nu)^{3/2} \Delta Z \vartheta(y)}{3eh \beta U}\right) (1-R)(1 - \exp \alpha L) W \eta / h \nu N c \Gamma$$

де $\vartheta(y)$ и $t^2(y)$ -четные медленно-убывающие функции [1]; диапазон изменения аргумента $1 > y \geq 0$; $y = (e^3 \beta U / \Delta Z)^{1/2} / (\varphi - h\nu)$ -относительное снижение высоты потенциального барьера для неравновесных фотоэлектронов; m – масса электрона; α -коэффициент поглощения оптического излучения эмиттером; η -квантовая эффективность; L -эффективная глубина проникновения оптического излучения в эмиттер; N -концентрация свободных носителей в эмиттере; W -оптическая мощности, β – форм-фактор локального усиления напряженности поля; U –разность потенциалов внешнего поля на зазоре ΔZ .

Экспериментально туннельный фототок был обнаружен в вакуумных микродиодах, фотоэмиттер которых создан на основе матрицы диодных ячеек планарно-торцевых автоэмиссионных структур (ПТАС) с лезвиями α -углерода. Фотодиод представлял собой совокупность эмиттерных гребенок (последовательность пространственно-периодических микролезвий с острием кромки длиной 200 нм и толщиной 20 нм) и анодов, расстояние между плоскостями которых составляло в различных образцах 1-3 мкм.

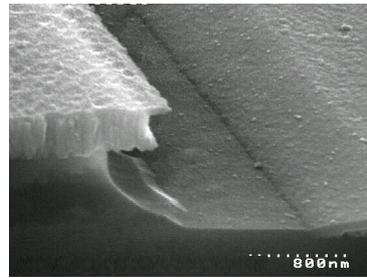
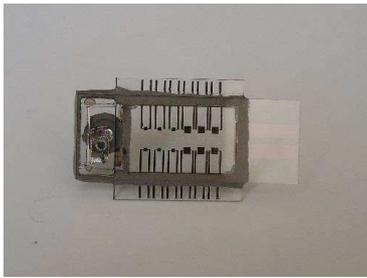
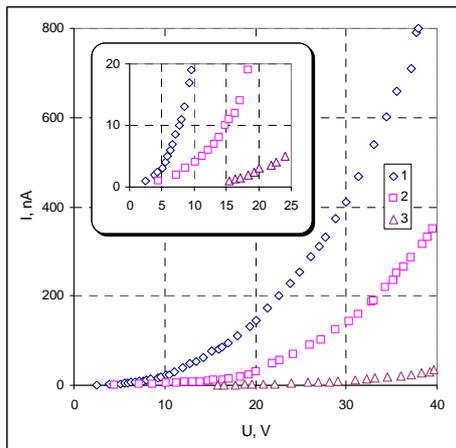


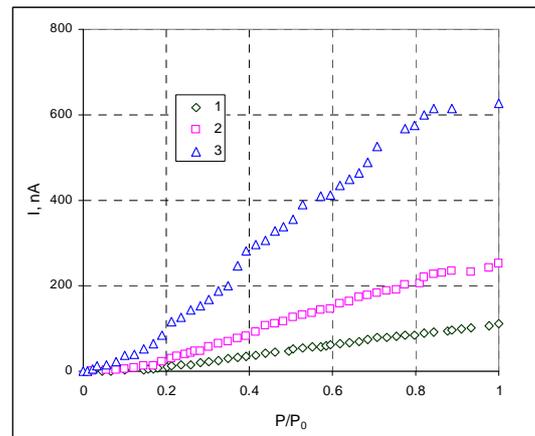
Рис.1.

Экспериментальный образец ПТАС из 12 микродиодов и фрагмент ПТАС показаны на рис. 1.

Результаты эксперимента при детектировании лазерного излучения с длиной волны 473 нм с помощью микродиода представлены на рис.2.а,б.



а



б

Рис. 2 а. Вольтамперная характеристика фотодиода с наноразмерным углеродным эмиттером при облучении синим твердотельным лазером DPSS (Optronic), длина волны 473 nm, энергия фотона $h\nu=2,617$ eV, выходная мощность 20 mW (1); 2 mW (2), темновая автоэмиссионная характеристика (3)

Рис. 2 б. Зависимость тока фотодиода от уровня детектируемой лазерной мощности P/P_0 с длиной волны 473 nm для трех значений ускоряющего поля при напряжении: $U=21.6$ (1), 30.1 (2), 39.5 V (3)

Таким образом, в сильных электростатических полях как фотоэмиссионный, так и темновой автоэмиссионный токи являются туннельными токами Фаулера-Нордгейма: неравновесных фотоэлектронов – при облучении эмиттера потоком фотонов, равновесных электронов – при выполнении условий полевой эмиссии. В отличие от классического ФЭ, который наблюдается лишь при энергии фотона, превышающей работу выхода материала, (вероятность туннелирования равна 1), туннельный фототок в сильном (10^7 - 10^8 V/cm) поле возникает при меньшей энергии фотона (экспериментально доказана возможность снижения более чем в 6 раз). Тем самым обеспечивается управление красной границей ФЭ в диапазоне длин волн от УФ до ИК. Оценки быстрого действия такого вакуумного микрофотодиода позволяют утверждать, что постоянная времени может быть менее 1 пикосекунды.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 12-07-12066-офи_м.

Библиографический список

1. *Fowler R.H., Nordheim L.* Electron Emission in Intense Electric Fields // Proc. Roy. Soc. Lond. 1928. A119. P. 173-181.
2. *Акчурин Г.Г., Якунин А.Н., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Акчурин Г.Г., мл.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. №. 12. С.8-16.

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МЕТОДЫ МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ НАНОЧАСТИЦ

Д.И.Биленко¹, В.В.Галушка¹, И.В.Галушка¹, Я.Д.Карсакова¹, Д.В.Терин^{1,2}

¹Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Энгельсский технологический институт Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

E-mail: dibilenko@gmail.com

В развитии современной нанотехнологии прослеживаются две основные тенденции - уменьшение размеров и увеличение сложности нанобъектов. Физически и химически модифицированные атомы внешних слоёв «исходного» зерна, присоединённые к ним ионы, атомы и молекулярные комплексы из среды, в которой синтезировались, находились и находятся частицы, создают оболочку. Совокупность свойств ядра и оболочки определяющим образом влияют на структуру, энергетический зонный спектр, химические и физические свойства образования. Фактически объектом является не однородная наночастица, а сложное образование, которое в первом приближении можно рассматривать как систему, образованную однородным ядром и окружающей его оболочкой. Это порождает увеличение числа параметров, необходимых для описания откликов на всё растущее многообразие внешних воздействий, необходимость знания новых зависимостей связей откликов со строением объектов и внешней средой.

Результаты ряда расчётов подобных структур, выполненных «из первых принципов» рядом авторов и нами с использованием пакета «Quantum Wise», рис.1а и 1б. иллюстрируют сказанное. Ряд работ [1-3] подтверждают существенное изменение свойств образований при вариации ядра и оболочек частиц на атомарном уровне.

Установлено, что возможности таких расчётов даже для решения прямых задач, как и экспериментального изучения таких систем принципиально затрудняются рядом специфических явлений и факторов. Высокие химическая и адсорбционная активность, как и неустойчивость метастабильного состояния изучаемых систем, приводят к заранее не предсказуемым изменениям их геометрии, структуры и свойств при воздействии анализирующего агента и, или, изменении окружающей среды.

В качестве примеров приведём обнаруженные нами явления [4] - рост диаметра PVP оболочки наночастиц серебра со скоростью более 2 нм/мин и

массоперенос серебра в системе Ag - AgI под воздействием электронного луча в электронном микроскопе, иллюстрируемый рис. 2 а.

Априори неизвестные модификации исследуемых систем могут происходить под воздействием квантов видимого и ультрафиолетового излучений, сильных полей и механических воздействий, возникающих при использовании зондовых методов. Анализирующие частицы и кванты с высокой энергией вызывают изменение и образование новых слоёв, которые приводят к артефактам, например, к искажению данных об элементном составе при анализе рентгеновского излучения в растровой электронной микроскопии (рис.2 б) [4].

Представляет интерес поиск и развитие методов, в которых анализирующие агенты оказывали бы минимальное воздействие и обладали возможностями многопараметрового определения свойств нанобъектов. В докладе показано, что использование низкочастотной области спектра, в которой энергия кванта меньше энергии метастабильного перехода, а период колебаний больше времени релаксации импульса и периодов колебаний частиц объекта, удовлетворяет этим требованиям и позволяет получать многопараметровую информацию о свойствах нанобъектов.

Непосредственно измеряемыми являются образцы композитов, образованные веществом-связкой, в котором содержится известная объёмная доля исследуемых частиц. Определяемой экспериментально является частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости композита, по которой решением обратной задачи находят действительную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости непосредственно нанобразований. Знание спектральных зависимостей последних позволяет определять спектральную зависимость ряда неизвестных параметров нанобразований.

Избыточность экспериментальных данных позволяет судить о соответствии моделей и предположений, заложенных в расчёт, исследуемым объектам. Дисперсионные соотношения в рассматриваемом низкочастотном диапазоне упрощаются и приобретают общность. В отличие от ряда работ [5,6] нами учтена возможная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости компонентов от проводимости и времени релаксации импульса носителей заряда. Установлено, что не только в высокочастотной, но и в низкочастотной области компоненты комплексной диэлектрической проницаемости композитов, содержащих нанобъекты, немонотонно и резонансно зависят от частоты и ряда параметров частиц - размеров зерна и оболочки и их свойств, в частности, проводимости. Это иллюстрируется рис. 3.

Применение этих методов низкочастотной импедансометрии позволило не только определить толщину оболочки наночастиц кремния, проводимость зерна наночастиц, но и установить, что она зависит от частоты как ω^n ($n \sim 1.8-2$). Полученные результаты указывают на то, что механизм проводимости в нанозернах отличается от свойственного монолитного кремния и прыжковый характер.

Несомненным достоинством низкочастотных методов является практическое отсутствие ряда артефактов свойственных электронной микроскопии и методам, использующим рентгеновское, ультрафиолетовое и видимое излучение с $\hbar\omega \ll kT$ и энергии изменения метастабильных состояний.

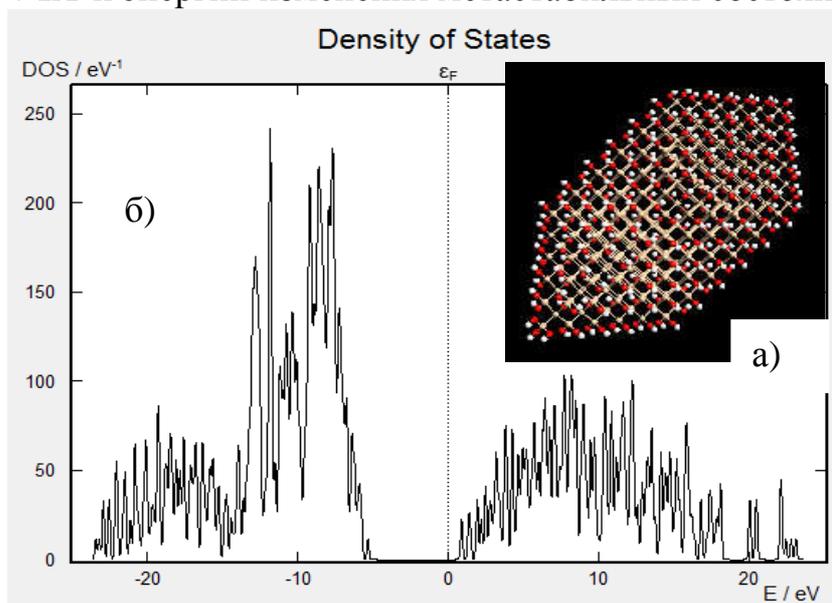


Рис.1. Модель наночастицы кремния с гидрогенизированной поверхностью (а) и плотность состояний в ней (б)

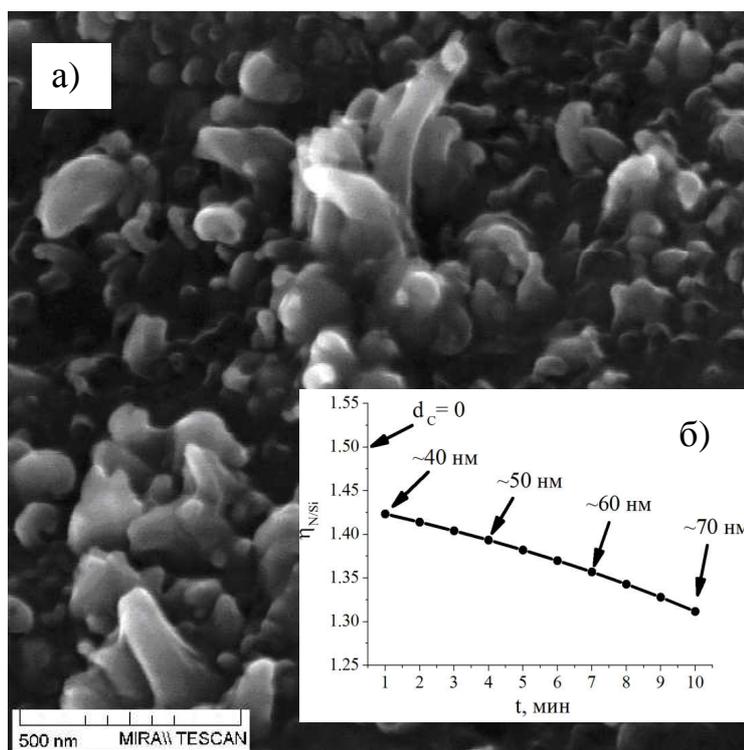


Рис. 2. СЭМ изображение серебряных кластеров, образованных под воздействием электронного облучения структуры AgI/Ag (а) и зависимость изменения регистрируемого отношения азота к кремнию в Si_3N_4 от времени анализа, вызванное образованием нанометрового углеродного слоя на поверхности (б)

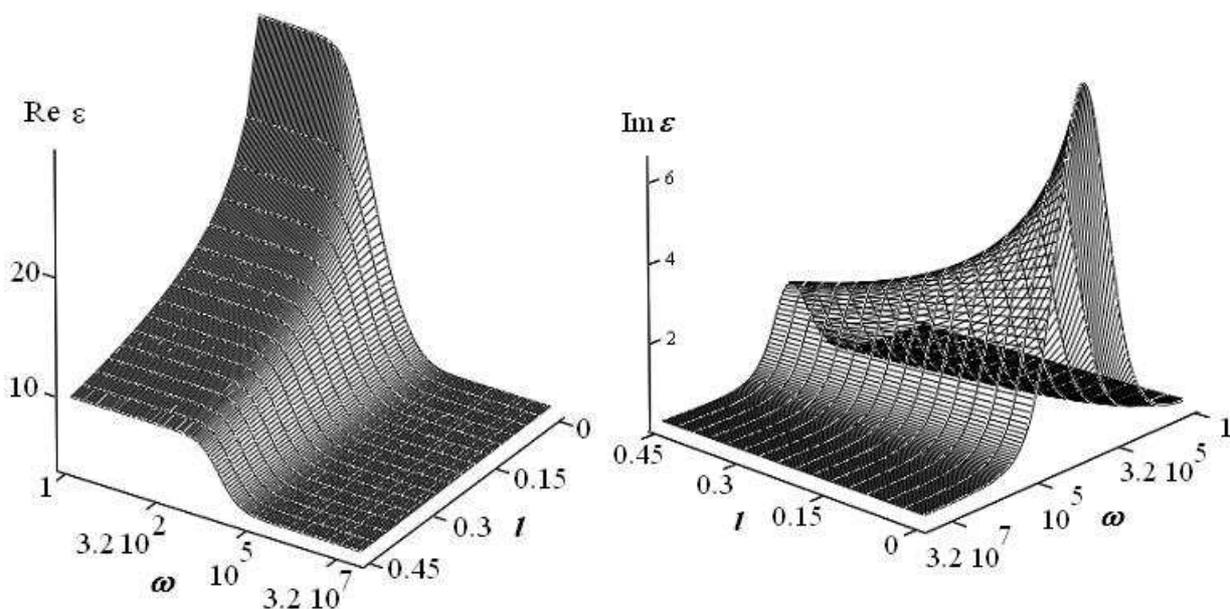


Рис. 3. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости композита от частоты и толщины оболочки

Библиографический список

1. *Thompson W.H. et al.* The effect of ultrathin oxides on luminescent silicon nanocrystallites // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V.73, P.841.
2. *Belomoin G. et al.* Oxide and hydrogen capped ultrasmall blue luminescent Si nanoparticles // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V.77. P.779.
3. *Nayfeh M. H. et al.* Stimulated blue emission in reconstituted films of ultrasmall silicon nanoparticles // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. P.1131.
4. *Bilenko D. I. et al.* Memristor structures based on tunnel-thin organic dielectric and porous silicon layers // *Proc. Conf. Intern. conf. on Actual problems of electron devices engineering (APEDE)*. Saratov. 2012. P. 436-437
5. *Neeves A. E. et al.* Composite structures for the enhancement of nonlinear-optical susceptibility//*J. Opt. Soc. Am.* 1989. B V.6. P.787.
6. *Buchelnikov V. D et al.* Heating of metallic powders by microwaves: Experiment and theory // *J.Appl. Phys.* 2008. 104. P.113505.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ АВТОДИНЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ ПРИ МИКРО- И НАНОСМЕЩЕНИЯХ

*Д.А. Усанов, Ан.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин, М.Ю. Калинин,
Е.О. Кацавцев, Е.И. Астахов*

Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского
E-mail: skripalav@info.sgu.ru

Для измерения параметров движения объектов при микро и наносмещениях широкое распространение получили методы, основанные на использовании эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах

[1-6]. Автодинные измерительные системы, созданные на основе такого эффекта, по сравнению с интерференционными системами обладают уменьшенными габаритами, весом, низким энергопотреблением.

Система, состоящая из полупроводникового лазера и внешнего отражателя, сочетает функции генератора и детектора фазы электромагнитной волны в одном устройстве. Возвращенная внешним отражателем в резонатор лазера волна приводит к изменению концентрации носителей заряда в активной среде, а также связанному с концентрацией показателю преломления активной области. Изменение показателя преломления, в свою очередь, вызывает изменение оптической частоты генерации. В силу вышесказанного форма автодинного сигнала начинает отличаться от формы интерференционного сигнала, формируемого таким же движением отражателя в интерференционной системе с развязкой от источника излучения [7-9].

Важным параметром при проведении измерений характеристик движений объекта с использованием лазерной автодинной системы является уровень внешней оптической обратной связи. В автодинной системе режим, при котором автодинный сигнал аналогичен интерференционному, возможен при низких уровнях обратной связи. При увеличении уровня обратной связи происходит искажение автодинного сигнала в отличие от случая, когда интерференция происходит в системе, отделенной от источника сигнала развязывающим элементом. Уровень внешней оптической обратной связи оказывает существенное влияние на форму автодинного сигнала полупроводникового лазерного излучателя и, как результат, на точность определения параметров движения отражателя в автодинных системах.

Одним из преимуществ автодинной системы на полупроводниковом лазере является возможность создания систем измерения вибраций и перемещений методом, основанным на сравнении с эталоном, в качестве которого используется длина волны излучения полупроводникового лазера. В частности, таким образом измеряется величина смещения или расстояние до отражателя. Если же величина смещения существенно меньше длины волны лазерного излучения, то можно применить метод, основанный на возбуждении дополнительных колебаний с известными характеристиками [10]. Для калибровки интерференционного сигнала в автодинной системе можно использовать модуляцию длины волны излучения полупроводникового лазера, которая, в свою очередь, может быть достигнута, например, модуляцией тока питания лазера [11].

Для определения ускорения движущегося объекта при микро- и наномещениях регистрируется автодинный сигнал, типичная форма которого приведена на рис.1. Вычисленное в результате решения обратной задачи по представленному на рис.1 автодинному сигналу среднее значение ускорения составило $a = 0.215 \times 10^{-7} \text{ м/с}^2$.

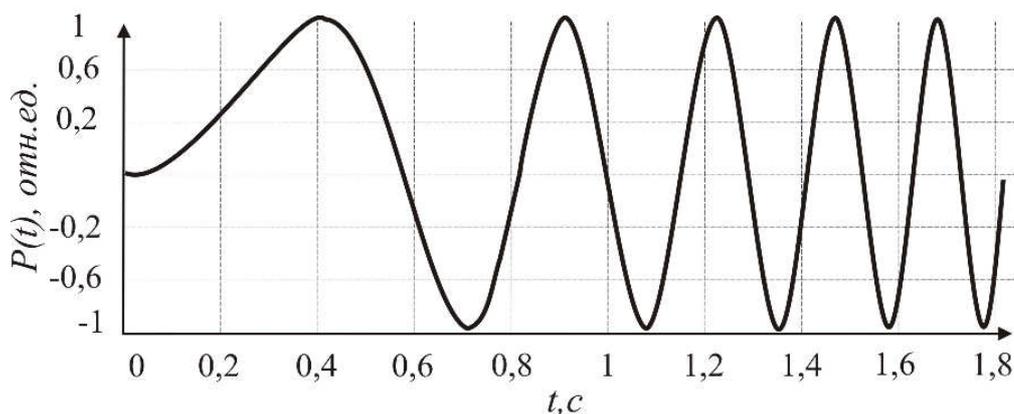


Рис.1. Вид функции автодинного сигнала при равноускоренном движении внешнего отражателя, полученный при моделировании

Вид экспериментальной установки для исследования движения объекта с ускорением приведен на рис.2. Объектом исследований было выбрано коммутационное электромагнитное реле типа 904.3747. Излучение полупроводникового лазера 1, стабилизированного источником тока 2, направлялось на электромагнитное реле 3, которое подключалось к генератору сигналов 4. Фиксация объекта исследования обеспечивалась механизмом 5. Часть излучения, отражённого от объекта, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось фотодетектором 6. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель 7 на аналого-цифровой преобразователь 8. Цифровой сигнал с АЦП для последующей обработки сохраняли в памяти ЭВМ 9.

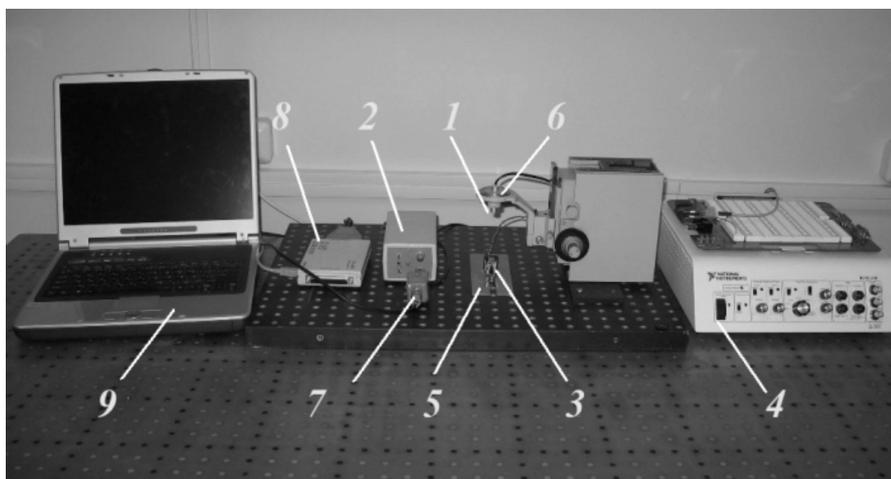


Рис.2. Внешний вид лазерной автодинной измерительной системы

При проведении измерений на движущийся якорь реле направлялось лазерное излучение. Излучение, отраженное от поверхности якоря, регистрировалось встроенным фотодетектором. С фотодетектора сигнал через АЦП поступал на компьютер, где и сохранялся для последующей обработки.

Для измерения амплитуд нановибраций использовалась токовая модуляция лазерного излучения, позволяющая реализовать одновременные измерения на нескольких длинах волн лазера. Это открывает возможность прове-

дения измерений амплитуд нановибраций без дополнительного механического возбуждения колебаний с микронной амплитудой в исследуемом объекте, необходимого для калибровки.

Ранее токовая модуляция полупроводникового лазерного автодина использовалась нами для учета влияния уровня внешней оптической обратной связи на измеряемое значение амплитуды нановибраций, при этом использовалась предварительная калибровка автодинного сигнала, реализуемая возбуждением дополнительных механических колебаний отражателя [12].

Для определения амплитуды нановибраций отражателя при токовой модуляции полупроводникового лазера необходимо получить выражение для амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала. В общем случае при произвольном соотношении величин частоты модуляции лазерного излучения и частоты колебаний отражателя анализ формы автодинного сигнала затруднителен в связи с возрастанием сложности математической обработки сигнала, формируемого в такой системе. На практике возможно реализовать случай синхронизации частоты и начальной фазы колебаний отражателя с начальной фазой и частотой модуляции лазерного излучения. В этом случае решение обратной задачи о нахождении характеристик нановибраций по автодинному сигналу существенно упрощается.

В состав установки входили частотномодулированный полупроводниковый лазерный автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 нм, излучение которого направлялось на объект, закрепленный на пьезокерамической пластинке, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял 1 мм. Модуляция длины волны излучения проводилась на частоте $\Omega = 500$ Гц посредством модуляции тока питания лазера с помощью встроенного в учебную лабораторную станцию виртуальных приборов NI ELVIS генератора сигналов. Изменение тока питания лазерного диода осуществлялось путем изменения напряжения питания, подаваемого на полупроводниковую структуру от блока управления током питания. Колебания пьезокерамической пластинки осуществлялись путем подачи переменного напряжения с генератора, амплитудой 20 мВ и 10 мВ, что соответствует колебаниям пластинки с амплитудой около 55 нм и 30 нм, соответственно. Частота и начальная фаза колебаний пьезокерамической пластинки синхронизированы с частотой и начальной фазой модуляции длины волны лазерного излучения, с помощью программного обеспечения к лабораторной станции NI ELVIS, в котором выставляются параметры генерируемых сигналов.

Нами было экспериментально установлено, что эффективная модуляция тока питания лазерного диода наблюдалась при амплитуде модулирующего сигнала 20 мВ, что обеспечивало наличие в спектре автодинного сигнала 2-й и 4-й спектральных составляющих. Отметим, что лазерный диод запитывался от источника тока. Отраженное излучение направлялось в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником. Продетектированный и усиленный сигнал с фотоприемника, проходил через

фильтр переменного сигнала и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя (с частотой дискретизации 100 кГц), соединенного с компьютером.

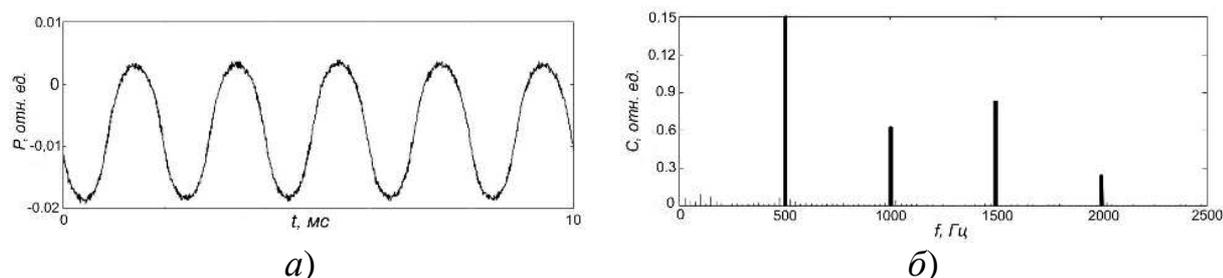


Рис.3. Экспериментальный автодинный сигнал и его спектр:

а) частотномодулированный автодинный сигнал при колебаниях отражателя, б) спектр автодинного сигнала

При проведении измерений колебания в пьезокерамической пластинке возбуждались с помощью генератора с частотой $\Omega = 500$ Гц. Зарегистрированный частотномодулированный автодинный сигнал и его спектр приведены на рис. 3. Измеренное значение амплитуды колебаний отражателя в эксперименте составило $\xi = 55 \cdot 10^{-9}$ м со среднеквадратичным отклонением $\Delta = \pm 4.5 \cdot 10^{-9}$ м.

Таким образом, для частотномодулированного лазерного излучения может быть решена обратная задача восстановления амплитуды нановибраций по набору спектральных составляющих сигнала, полученного при разложении автодинного сигнала в ряды по функциям Бесселя и Фурье. С помощью компьютерного моделирования и реализованной на практике измерительной схемы показано, что амплитуды вибраций пьезокерамической пластины могут определены с погрешностью менее 20%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. Tromborg B., Osmundsen J. H., Olesen H. Stability analysis for a semiconductor laser in an external cavity// IEEE J. Quantum Electron. 1984. V.QE-20. P. 1023–1032.
2. Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser// IEEE J. Quantum Electron. 1986. V.22. P. 762–773.
3. Shunc N., Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback// IEEE J. Quantum Electron. 1988. V.24. P. 1242–1247.
4. Семенов А. Т. Инжекционный лазер в режиме автомодуляции// Квантовая эл-ка. 1971. №6. С. 107.
5. Гершензон Е. М., Туманов Б. Н., Левит Б. И. Автодинные и модуляционные характеристики инжекционных полупроводниковых лазеров// Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т.23. №5. С. 535–541.
6. Сурис Р. А., Тагер А. А. Когерентность и спектральные свойства излучения полупроводникового лазера с внешним отражателем// Квантовая электроника. 1984. Т.11. №4. С. 35–43.

7. Unlocking dynamical diversity: Optical feedback effects on semiconductor lasers. Edited by Deborah M. Kane and K. Alan Shore -John Wiley & Sons Ltd, The Atrium. 2005. P.333.
8. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В.* Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // Квант. Электроника. 2011. Т. 41 №1. С. 86–94.
9. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинин М. Ю.* Формирование автодинного сигнала в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т.6. №1. С.3–9.
10. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В.* Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме // Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С.51–57.
11. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С.* Определение расстояния до объекта с помощью частотномодулированного полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. 2007. Том 33. №21. С. 72-77.
12. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кацавцев Е.О., Калинин М.Ю.* Измерение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом влияния обратной связи // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 12. С. 81-86.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

*А.В.Крайский¹, В.А.Постников², Т.Т.Султанов¹, Т.В.Миронова¹,
А.А.Крайский¹, М.А.Шевченко¹*

¹ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва,

² ФГБУ «НИИ физико-химической медицины», ФМБА России, Москва.

E-mail: kraiski@sci.lebedev.ru

В ряду оптических сенсоров компонентов жидкостей голографические сенсоры (ГС) обладают рядом преимуществ. Они имеют достаточно высокую чувствительность, просты в использовании, имеют хорошую точность, обратимы и могут применяться многократно. Сенсоры могут применяться для измерения кислотности (рН) водных растворов, содержания ионов тяжелых металлов (например, рис.1), содержания глюкозы в крови и в др. биологических жидкостях, наличия спор бактерий, метаболитов, роста бактерий, влажности, для анализа лактата в плазме крови, содержания горючих углеводородных газов в воздухе.

Голографические сенсоры представляют собой денисюковские голограммы на основе полимерной гидрогелевой пленки, в нанопорах которой размещаются наночастицы серебра, образующие периодические слои так, что при отражении белого света отражается только компонента излучения, резонансная периоду слоев. Специфичность отклика сенсора реализуется из-за того, что в пленку встроены вещества, обеспечивающие селективное взаимодействие с искомым компонентом анализируемой смеси, что приводит к набуханию или сжатию гидрогелевой матрицы. Результатом этого является изменение периода слоев, что сопровождается изменением отражаемой длины волны, т.е. изменением цвета сенсора. Изготавливаются они, как правило, в

фоточувствительных галогидосеребряных эмульсиях при экспозиции голограммы плоской волны во встречных пучках.

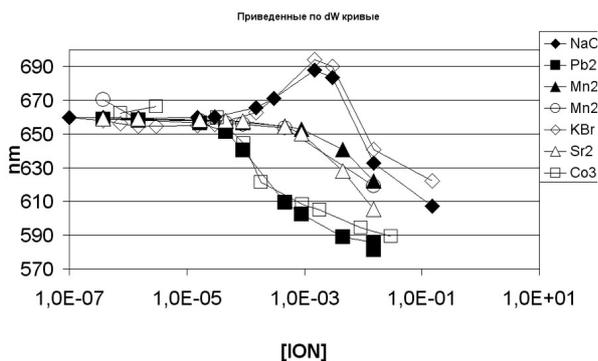


Рис.1. Отклик сенсоров для ряда ионов металлов [2]

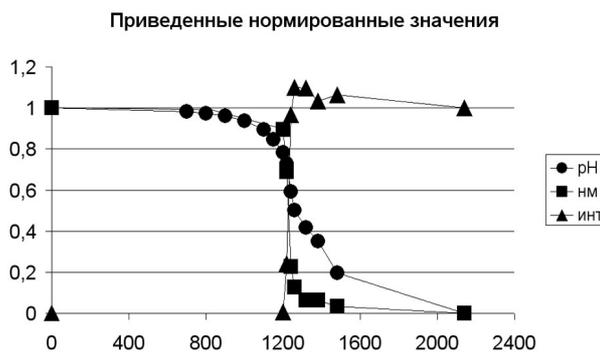


Рис.2. Кривые титрования (приведенные, нормированные) по кислотности (измеряется в растворе), длине волны, интенсивности (отклик сенсора)[2] (абсцисса—мкл0.1 NaOH)

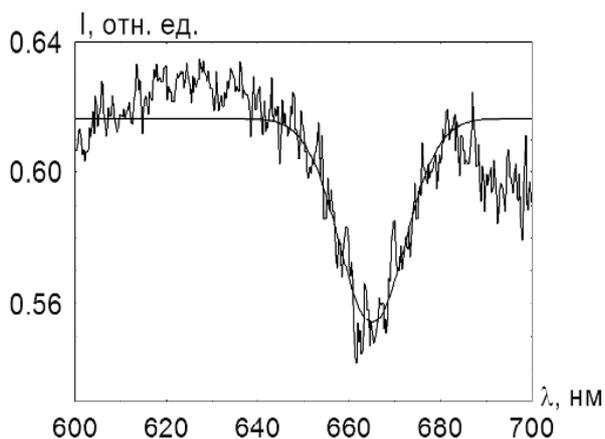


Рис.3. Спектр пропускания голографического сенсора. Сплошная гладкая кривая – подогнанная по методу наименьших квадратов аппроксимация спектра постоянным фоном с провалом (брэгговское отражение)

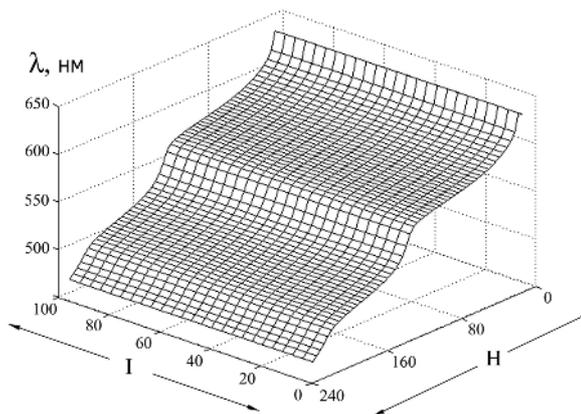


Рис.4. Градуировочная поверхность рабочего фотоаппарата для колориметрического метода в RAW-формате. N - координата цветности, I – яркость [5].

В связи с обнаруженной нами возможностью резкого изменения дифракционной эффективности (ДЭ) при изменении параметров раствора (рис.2 [2]) важно выбрать параметры сенсора так, чтобы обеспечить правильный режим его работы, поскольку при большом коэффициенте отражения может уменьшиться глубина проникновения излучения в слой, увеличиться ширина линии отражения и ухудшиться точность измерения длины волны и измеряемого компонента раствора.

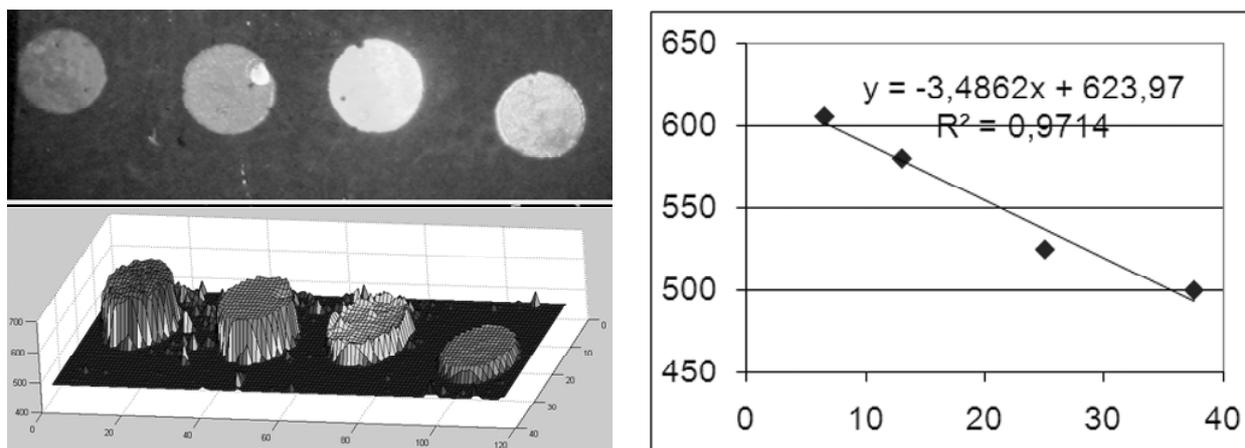


Рис.5. слева сверху - фотография строки из 4-х ячеек, содержащих водно-спиртовой раствор с содержанием спирта: (слева - направо) 6.25%, 12.5%, 25%, 37.5%. внизу - карта длин волн в изометрической проекции. Координаты в плоскости изображения – в относительных единицах. справа - зависимость длины волны отклика от концентрации спирта. Абсцисса – содержание спирта, %, ордината – длина волны, нм.

К основным оптическим параметрам слоя, определяющим режим работы сенсора, относятся период интерференционных слоев, амплитуда переменной части показателя преломления, толщина голографического слоя. Их можно вычислить с помощью спектральных данных.

Зная ДЭ, мы можем определить амплитуду переменной части показателя преломления. Наиболее просто ДЭ определять, когда в спектре пропускания голографического слоя виден провал, связанный с брэгговским отражением (рис.3). Тогда для не поглощающих и не рассеивающих голографических слоев он будет в точности соответствовать линии брэгговского отражения и ДЭ есть отношение глубины провала к среднему уровню пропускания вблизи провала. Такие условия выполняются, например, для отбеленных голограмм. Следует отметить, что в процессе работы, особенно при переходе из одного стационарного состояния в другое при смене раствора часто происходит неоднородное изменение набухания голографического слоя, вследствие конечного времени диффузионной замены состава раствора внутри слоя. К тому же скорость диффузии отдельных компонентов раствора может сильно различаться.

Спектр коэффициента пропускания отбеленной голограммы показан на рис.3. Для идеального слоя при малом коэффициенте отражения форма спектра отражения должна иметь вид функции $(\sin(x)/x)^2$. Для такого спектра ширина его на половине высоты $\Delta\lambda$ определяется выражением $\Delta\lambda = 0.886 \lambda/N$, где N- число слоев. Интенсивность в максимуме $I = I_0(\pi(\Delta nH)/(2n_0\Lambda))^2$, где n_0 – среднее значение показателя преломления среды, $\Delta n (\ll n_0)$ – амплитуда переменной части показателя преломления, Λ – период изменения показателя преломления. Однако реальный спектр отражения хороших слоев в стационарных условиях неплохо описывается гауссовой функцией с ширинами от 6 до 20 нм [2]. Это, по-видимому, связано с неидеальностью голограммы и конечной шириной аппаратной функции спектрального прибора (около 5 нм). Для спектра на рис.3, аппроксимирующую функцию выбрали в виде посто-

янного фона (1 подгоночный параметр) и гауссова провала (3 подгоночных параметра). Подгонка параметров этой функции дает следующее: положение максимума $\lambda = 665.2$ нм, ширина провала $\Delta\lambda = 17.08$ нм, дифракционная эффективность $\eta = 0.100$. Число слоев составляет 34.5, толщина эмульсии 8.63 мкм (показатель преломления для среды составляет 1.33). Из выражения (3) получаем амплитуду переменной части показателя преломления $\Delta n = 0.0077$. Т.о. по формальным признакам мы находимся в пределах применимости выражений приведенных выше выражений. Для больших значений ДЭ мы применяли другой подход.

Существенным преимуществом голографических сенсоров является относительная простота использования их в качестве многоканальных сенсоров, вследствие локальности отклика. Наиболее доступно одновременное определение тестируемого компонента в различных растворах, однако возможно и определение различных компонентов одного и того же раствора, либо и то и другое. Это можно делать, помещая анализируемые образцы в различных областях сенсора, свойства которого одинаковы, либо изменяя свойства самого сенсора в различных точках. Мы формировали матрицы ячеек объемом около 30 мкл. В работе приводится пример сопоставления измерений образцов плазмы крови с известным содержанием глюкозы. Для реализации всех возможностей такой конструкции при одновременном анализе ряда различных образцов был предложен и разработан колориметрический способ измерения распределения длины волны узкополосного светового излучения, отраженного от поверхности сенсора, по его цифровому цветному изображению, полученному, например, с помощью цифрового фотоаппарата [3-4]. Суть способа состоит в том, что поскольку отраженное голограммой излучение узкополосно (спектральная ширина до 20 нм), то по соотношению сигналов в цветовых компонентах пикселя изображения можно однозначно определить длину волны (строго говоря - среднюю длину волны). Фотоаппарат требуется откалибровать, т.е. построить характеристики, с помощью которых по значению цветовых компонент пикселя определяется длина волны [3]. Из-за особенностей бытовых форматов (bmp, jpg, jpeg, tiff и т.п.) пришлось работать в трехмерном пространстве: нижняя координатная плоскость содержала оси интенсивности и цветности, вертикальной осью была ось длин волн. В этом трехмерном пространстве строилась характеристическая поверхность (рис.4), т.е. поверхность, связывающая интенсивность и цветность отклика фотоаппарата с длиной волны света, действовавшей на этот пиксель приемной матрицы при экспозиции [3-4]. Перебирая последовательно все пиксели обрабатываемого изображения, строили изображение в длинах волн, т.е. получали карту длин волн. Для бытовых форматов мы использовали участок желтой области спектра 570-600 н. Переход к работе в RAW-формате [4] позволил расширить рабочий диапазон до 455-625 нм, т.е. более чем в 5 раз. Это явилось следствием того, что в этом формате мы работаем с неискаженными компьютером фотоаппарата данными.

На рис.5 показаны результаты определения длин волн колориметрическим способом с помощью характеристической поверхности, изображенной

на рис.4 для строки из 4-х ячеек, с содержанием спирта: 6.25%, 12.5%, 25%, 37.5%. Концентрация спирта увеличивалась слева направо. Изображения имели цвета красный, оранжевый, зелено-голубой и голубой. Чувствительность составила 3.48 нм/(спирт,%). Наблюдаемое изменение длины волны (от 606 до 500 нм) составило 106 нм.

Работа поддержана грантом в рамках программы №5 фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные науки - медицине”.

Библиографический список

1. *Marshall A.J., Lowe Ch.R. et al.* J.Phys.Condens.Matter., 18,619-626. (2006); патент США №5989923 от 23.11.1999 Lowe Ch.R., Millington R.B., Bluth J., Mayes J.E..
2. *А.В.Крайский, В.А.Постников, Т.Т.Султанов, А.В.Хамидулин.* Голографические сенсоры для диагностики компонентов растворов // Квантовая электроника. 2010 Т.40. №2. С.178-182.
3. *А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов.* Измерение поверхностного распределения длины волны узкополосного излучения колориметрическим методом // Квантовая электроника. 2010 Т.40. №7. С.652 - 658.
4. *А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов.* Измерение длины волны узкополосного излучения при обработке цифровых фотографий в RAW-формате. // Квантовая электроника. 2012. Т.42. №12. С.1137-1139.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ, СТРУКТУРИРОВАННОГО МЕТАЛЛОМ В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ

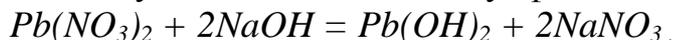
С.В.Стецюра, И.В.Маляр, Е.В.Попова

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: popovaev0607@gmail.com

Содержание солей (NaCl и др.) водорастворимых полимеров в воде может существенно сдвигать pH раствора в щелочную сторону. При изменении кислотности субфазы, как известно, существенно меняется растворимость многих водорастворимых неорганических солей. Изменение степени растворимости, в свою очередь, приводит к коагуляции металлосодержащих молекул субфазы, а при использовании такого раствора при создании ПЛБ – к существенному изменению ее химического состава и морфологии. Эта зависимость может быть использована как управляющий фактор при создании структурированных металлом органических покрытий для создания платформ биочипов с заданным распределением поверхностного потенциала [1,2].

Исследования проводились на примере монослоя, получаемого на водной субфазе с кислотностью $pH=9$, с содержанием нитрата свинца концентрацией $c=10^{-3}$ моль/л. Значение pH достигалось добавлением в водную субфазу щелочи $NaOH$.

Использование нитрата свинца объясняется его хорошей растворимостью в воде. В щелочной среде при повышении pH раствора растворимость $Pb(NO_3)_2$ уменьшается, и могут образовываться гидроксонитраты переменного состава $Pb(OH)_x(NO_3)_y$, а при $pH = 9$ и более наблюдается высокая дисперсность среды, вызванная коагуляцией металлосодержащих частиц, которая приводит к неустойчивому состоянию водной субфазы:



Было отмечено, что при изготовлении водной субфазы, содержащей щелочь $NaOH$ и $Pb(NO_3)_2$, на границе раздела вода - воздух образовывалась пленка, изменение состава (динамику во времени) которой исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira // LMU (Tescan, Чехия) с приставкой X-Stream для энергодисперсионного анализа и программным обеспечением INCA Energy от Oxford Instruments. Проводилось сканирование поверхности пленок, перенесенных на твердую подложку, в отраженных электронах, далее в 4-6 точках измерялись энергодисперсионные спектры в широком диапазоне энергий (пример сканированного изображения представлен на рис.1; процентное содержание присутствующих элементов в каждой сканируемой точке на этом скане показано в табл.1).

Табл.1-Процентное содержание элементов пленки

| Спектр | C | N | O | Na | Si | Cl |
|----------|------|-----|------|-----|------|-----|
| Спектр 1 | 43.5 | 2.0 | 41.0 | 9.2 | 3.6 | 0.4 |
| Спектр 2 | 49.6 | 0.7 | 13.7 | 1.3 | 34.5 | 0.0 |
| Спектр 3 | 25.0 | | 3.2 | 0.4 | 71.4 | |
| Спектр 4 | 37.6 | | 6.0 | 4.3 | 48.5 | 3.7 |
| Спектр 5 | 38.2 | 0.9 | 5.5 | 0.4 | 54.9 | 0.0 |

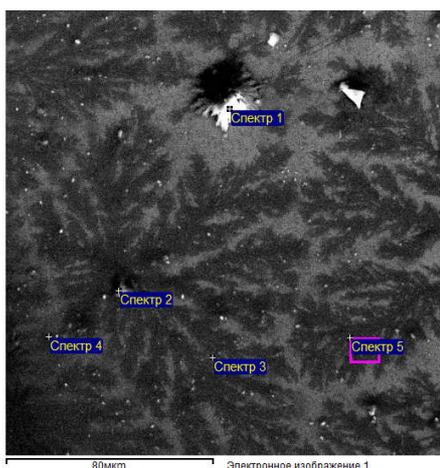


Рис.1. Сканированное изображение ПЛБ

Усредненные значения процентного содержания элементов во всех исследуемых пленках приведены на диаграммах (рис.2), из которых видно что, во всех случаях в достаточном количестве присутствуют такие элементы, как Si (отвечает за подложку), O (содержится в подложке и в нанесенном слое), N (регистрируется при образовании кластеров $Pb(NO_3)_2$), Na (попадает из раствора из соединения $NaOH$) и Pb . В течение часа значительной динамики по содержанию свинца, натрия и кислорода не наблюдается. В течение суток значительно увеличивается содержание кислорода и азота, что говорит о повышенном образовании гидроксонитратов $Pb(OH)_x(NO_3)_y$ за время хранения раствора. В течение первого часа пленка образована предположительно кристаллитами $Pb(NO_3)_2$.

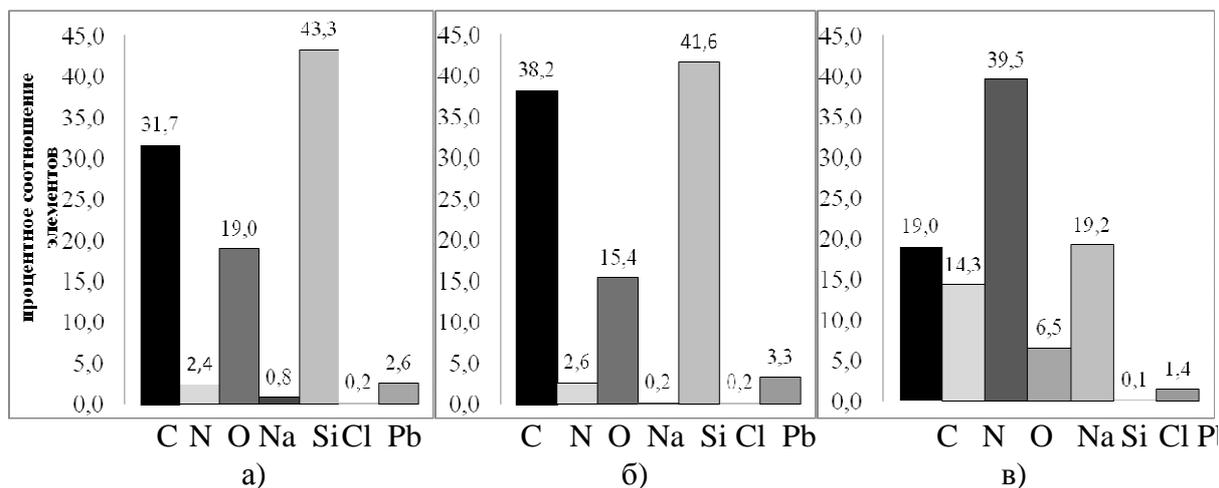


Рис. 2. Усредненные значения содержания химических элементов в пленках, полученных при разных временах выдержки раствора: а) пленка исследовалась сразу после получения раствора; б) через 1 час; в) через 24 часа

Таким образом, для получения пленки, максимально структурированной металлом, необходимо использовать свежеприготовленные растворы.

Для структурной организации металла в пленке были использованы поверхностно - активные вещества (ПАВ) и метод Ленгмюра- Блоджетт [3,4]. Исследовались органические пленки двух типов (с содержанием атомов металла и без атомов металла), полученные на установке KSV Nima LB Trough Medium KN 1003. На поверхность субфазы была нанесена арахидиновая кислота в объеме 50 мкл, контроль проводился с помощью изотерм сжатия (рис.3)

При добавлении ПАВ (арахиновой кислоты) в раствор на границе раздела вода - воздух, получили органическую пленку, структурированную металлом (*Pb*), содержание компонент в которой отличается от аналогичной пленки, формирующейся без добавления на поверхность ПАВ.

Обе полученные изотермы соответствуют изотермам образования соли арахидиновой кислоты. Было выдвинуто предположение, что в пленке ЛБ, не содержащей соль свинца, образуется соль арахидата натрия, что было подтверждено ЭДА. При сканировании во вторичных электронах видно, что пленка арахидата натрия (рис.1) имеет включения дендритной формы, образованной солями натрия.

Таким образом, были изучены особенности формирования органического покрытия, структурированного металлом в щелочной среде, показана возможность варьирования процентного соотношения солей натрия и свинца, а также содержания кислорода.

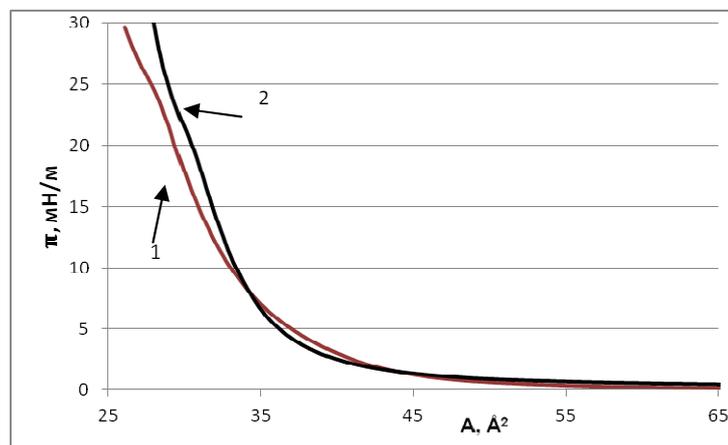


Рис.3. Изотермы сжатия монослоев арахиновой кислоты при pH=9:
1) с содержанием свинца в субфазе, 2) без содержания свинца в субфазе

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №14-02-31089-мол_а)

Библиографический список

1. W. Zhao, J.J.Xu, H.Y.Chen. Electrochemical Biosensors Based on Layer-by-Layer Assemblies // *Electroanalysis*. 2006. №18. P.1737 – 1748.
2. M.K. Ram, P. Bertocello, H. Ding, S. Paddeu, C. Nicolini. Cholesterol biosensors prepared by layer-by-layer technique // *Biosensors & Bioelectronics*. 2001. №16. P.849–856
3. Л. М. Блинов. Лэнгмюровские пленки // *Успехи физических наук*. 1988. Т. 155. №3. С.443-480.
4. J.B. Peng, G.T. Barnes, I.R. Gentle. The structures of Langmuir Blodgett films of fatty acids and their salts // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2001. №91. P.163- 219.

УСТРОЙСТВА НА ВОЛНАХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КЛАСС УСТРОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

А.И. Михайлов, С.А. Сергеев

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: MikhailovAI@info.sgu.ru, Sergeev@bk.ru

Физический предел минимальных размеров активных зон приборов и элементов схемотехнической микроэлектроники, по-видимому, уже достигнут. Это является серьезным дополнительным стимулом к становлению и развитию функциональной электроники, которая использует динамические неоднородности для обработки и хранения информации. Известно большое количество динамических неоднородностей различной физической природы. Это ансамбли заряженных частиц и квазичастиц (зарядовые пакеты, флюксоны и т.п.), домены (электрические домены, домены Ганна, цилиндрические магнитные домены и т.п.), динамические неоднородности волновой природы (поверхностные акустические волны, волны пространственного заряда (ВПЗ),

магнитные статические волны и т.п.). Основной тенденцией развития данного несхемотехнического направления микроэлектроники, использующего в качестве носителей информации динамические неоднородности, является интеграция функциональных возможностей приборов и устройств [1-8].

Применение волновых принципов разной природы перспективно в СВЧ микроэлектронике. Для обработки сигналов могут быть использованы различные волновые процессы: акустические волны, электромагнитные волны, магнитоэлектрические волны и волны пространственного заряда. Устройства, использующие динамические неоднородности волновой природы обладают рядом преимуществ:

- 1). Хорошая электрическая развязка между входом и выходом.
- 2). Устройства хорошо совместимы с распределенными параметрами линий передачи.
- 3). Многофункциональность.
- 4). Протяженность участка распространения волн, что дает возможность эффективного воздействия на полезный сигнал в процессе распространения.
- 5). Обработка информации происходит в аналоговом виде.
- 6). Малая длина волны. Это позволяет существенно уменьшить размеры структур.
- 7). Возможность усиления сигнала за счет внутренних свойств электронной подсистемы.

Особое внимание в работах авторов уделено функциональным возможностям распространения и параметрического взаимодействия ВПЗ в тонкопленочных полупроводниковых структурах (ТПС) с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). Показано, что устройства на ВПЗ в ТПС с ОДП могут выполнять в СВЧ диапазоне такие радиотехнические функции, как усиление, преобразование частоты, генерирование (при введении обратной связи), задержку, управляемую фильтрацию, коммутацию, синтез частот и др. [8-10]. Также показано, что механизм параметрического взаимодействия ВПЗ в ТПС с ОДП при низкочастотной накачке [10-15] приводит к заметному увеличению верхней граничной частоты усиливаемых ВПЗ, а также может являться основой для создания управляемых фильтров, перестраиваемых при изменении частоты накачки, и активных смесителей в коротковолновой части СВЧ диапазона в интегральном исполнении.

Был проведен анализ литературных данных, содержащих параметры и характеристики соединений A_3B_5 , с целью выяснения перспектив их использования в устройствах на волнах пространственного заряда. Был проведен анализ современной отечественной и зарубежной литературы, посвященной этим полупроводниковым соединениям. Проводилось сравнение таких параметров полупроводниковых соединений, как диэлектрическая проницаемость, пороговое поле эффекта Ганна, коэффициент диффузии электронов, напряженность электрического поля пробоя, коэффициент теплопроводности, ширина запрещенной зоны и значения энергетических зазоров между центральной и боковыми долинами, величина модуля отрицательной диффе-

рещиальной подвижности и дрейфовая скорость электронов. Также анализировались времена релаксации энергии электронов в центральной долине и междолинных переходов, и условие электрической устойчивости (критерий Кремера) для полупроводниковой структуры.

Сравнительный анализ основных свойств соединений A_3B_5 показывает, что фосфид индия InP , а также нитриды галлия GaN , индия InN и алюминия AlN являются перспективными материалами для использования их в устройствах на волнах пространственного заряда и потенциально по ряду свойств заметно превосходят $GaAs$. Причем, для каждого конкретного применения может быть выбрано наиболее подходящее соединение из группы A_3B_5 .

При этом следует иметь в виду, что технология получения и работы с новыми полупроводниковыми соединениями постоянно совершенствуется. Не исключено, что в ближайшее время появятся новые сведения об уже известных или пока еще недостаточно изученных материалах с хорошими перспективами их использования в приборах на волнах пространственного заряда.

Библиографический список

1. *Щука А.А.* Функциональная электроника // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. № 5-6. С. 149-168.
2. *Соляник С.П., Небогатых В.Е., Потапов А.С.* Перспективные направления функциональной микроэлектроники: учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. С.103.
3. *Щука А.А.* Функциональная электроника: Учебник для вузов. М.: МИРЭА, 1998. С.260.
4. *Гуляев Ю.В.* Акустоэлектроника (исторический обзор) // УФН. 2005. Т. 175. № 8. С.887-895.
5. *С.Г. Алексеев, Ю.В. Гуляев, И.М. Котелянский, Г.Д. Мансфельд.* Некоторые тенденции развития акустоэлектроники сверхвысоких частот // УФН. 2005. Т. 175, № 8. С.895-900.
6. *Щука А.А.* Нанoeлектроника. // М. Физматкнига. 2007. С.464.
7. *Калиникос Б.А.* Спиновые волны в ферромагнитных пленках // СОЖ. 1996. № 5. С. 93-100.
8. *Барыбин А.А.* Волны в тонкопленочных полупроводниковых структурах с горячими электронами // М.: Наука. 1986. С.288.
9. *Михайлов А.И., Сергеев С.А.* Граничная частота усиления волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах на основе n-GaAs, n-InP и n-GaN // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 1. С. 33-37.
10. *Михайлов А.И., Сергеев С.А.* Функциональные возможности распространения и параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах n-GaAs и n-InP в миллиметровом диапазоне // Перспективные направления развития электронного приборостроения. Материалы науч.-технич. конф. Саратов, ФГУП НИИП «Контакт», 18-19 февраля 2003 г. – Саратов, 2003. – С. 252-256.
11. *Барыбин А.А., Михайлов А.И.* Параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах // ЖТФ. 2000. Т. 70, № 2. С. 48-52.
12. *Михайлов А.И., Сергеев С.А., Горячев А.А.* Интегральный преобразователь частоты

миллиметрового диапазона длин волн на волнах пространственного заряда в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43. № 2. С. 16-24.

13. Барыбин А.А., Михайлов А.И. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах асимметричного типа на основе арсенида галлия n-типа // ЖТФ. 2003. Т. 73. №. 6. С. 103-109.
14. Михайлов А.И., Сергеев С.А. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в асимметричных тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью. Часть 1. Формулировка модели // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 2. С. 102-107.
15. Михайлов А.И., Сергеев С.А. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в асимметричных тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью. Часть 2. Результаты моделирования // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 4. С. 70-74.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СВЕТ-ЧАСТОТА НА ОСНОВЕ ВЫСОКООМНОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

А.И. Михайлов, И.О. Кожевников, А.В. Митин

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: kozhevnikov_io@rambler.ru

Одним из наиболее перспективных направлений современной микроэлектроники является функциональная электроника, основанная на использовании динамических неоднородностей, обеспечивающих несхемотехнические принципы работы устройств. В функциональной микроэлектронике используется взаимодействие потоков электронов со звуковыми и электромагнитными волнами в твёрдом теле, свойства полупроводников, магнетиков и сверхпроводников в магнитных и электрических полях и др. [1]. Использование возможностей функциональной микроэлектроники позволяет заменить сложные интегральные схемы их функциональными аналогами, что в свою очередь дает очевидные преимущества: меньший размер (высокая плотность интеграции), простота изготовления и др.

Как известно, для применения полупроводниковых оптических датчиков в цифровой электронике необходимо использование аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Кроме дополнительного потребления электроэнергии, АЦП вносит погрешности в детектируемый сигнал [2]. Избавиться от описанных недостатков можно отказавшись от использования АЦП, совместив функции фотодетектора и аналого-цифрового преобразователя в одном функциональном приборе. Функциональность в таком случае достигается выбором полупроводникового материала, сочетающего в себе комбинированное действие нескольких физических явлений.

Высокоомный арсенид галлия является нелинейной активной средой, в которой, помимо известного эффекта Ганна, возможно наблюдение характерной неустойчивости тока, обусловленной механизмом захвата электронов глубокими примесными центрами в полуизолирующем полупроводнике под действием сильного электрического поля (рекомбинационная неустойчивость тока). Образующаяся при этом динамическая неоднородность пространственного заряда в объеме полупроводника вызывает периодические низкочастотные (1 – 1000 кГц) колебания тока во внешней цепи.

Использование планарно-эпитаксиальных мезаструктур на основе высокоомного *n*-GaAs позволяет получить комбинированное действие двух физических явлений: рекомбинационной неустойчивости тока и внутреннего фотоэффекта. Исследования показали, что в таких структурах возможно наблюдение осцилляций тока, параметры которых в существенной степени определяются величиной постоянного приложенного напряжения, интенсивностью и локализацией засветки электромагнитным излучением из диапазона длин волн, соответствующих собственному поглощению арсенида галлия, и рядом других факторов [3,4]. На рис. 1 *а* приведена характерная форма колебаний тока на нагрузочном сопротивлении (100 Ом), включенном последовательно со структурой. Как видно из рис. 1 *а*, уровень выходного сигнала достаточен для согласованной работы с любым цифровым считывающим устройством.

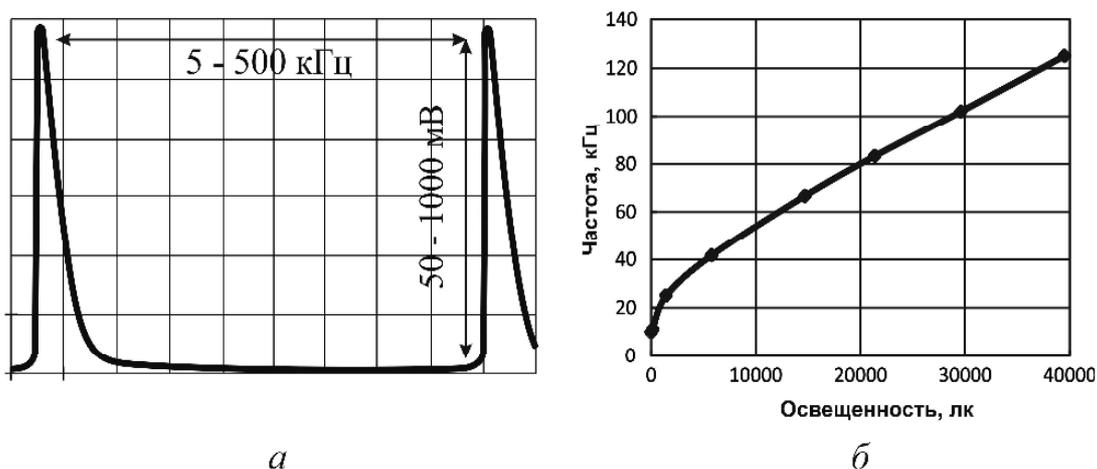


Рис. 1. Параметры наблюдаемых колебаний тока: *а* — форма токовых колебаний на нагрузочном сопротивлении, *б* — зависимость частоты колебаний от освещенности

Исходя из предположения, что частота рекомбинационных колебаний зависит от величины протекающего через структуру тока, которая, в свою очередь, определяется количеством генерируемых пар электрон-дырка в результате внутреннего фотоэффекта, зависимость частоты колебаний тока от освещенности должна повторять характерную (линейную) форму зависимости фототока от освещенности для GaAs, что подтверждается экспериментально (рис. 1 *б*).

Кроме основной функции прямого преобразования светового сигнала в цифровой, с помощью предлагаемого фотопреобразователя можно получать более широкие функциональные возможности. Например, в ходе экспери-

ментальных исследований было установлено, что при превышении некоторого порога интенсивности падающего излучения происходит срыв генерации. На рис. 2 приведена характерная для данного случая зависимость частоты колебаний от освещенности, на которой имеется два устойчивых положения, соответствующих логической единице (колебания присутствуют) и логическому нулю (колебания отсутствуют), переключение между которыми осуществляется засветкой конечной интенсивности (точки А и В). При этом положение точек А и В зависит от приложенного к структуре напряжения. Все это позволяет использовать такой преобразователь в качестве оптически-переключаемого логического элемента «НЕ» (инвертора).



Рис. 2. Зависимость частоты колебаний от освещенности с участком гистерезиса

Приведенные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о том, что планарно-эпитаксиальные мезаструктуры на основе высокоомного n -GaAs могут быть использованы для создания функционального однокристалльного преобразователя свет-частота с возможностью непосредственного подключения к любому цифровому входу без схем преобразования. Главными преимуществами такого прибора являются: более точная регистрация изменений частотного сигнала, чем амплитудного; простота технологии изготовления; более низкое энергопотребление; отсутствие АЦП, вносящего погрешности измерения.

Библиографический список

1. Шука А.А. Функциональная электроника. – М: МИРЭ. 1998. 260с.
2. Гельман М.М. Аналого-цифровые преобразователи для информационно-измерительных систем. – М.: Изд-во стандартов. 2009. С.317.
3. Михайлов А.И., Митин А.В. Экспериментальное исследование спектра колебаний тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах арсенида галлия в условиях засветки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 4. С.87–91.
4. 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 // Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ»: Сборник трудов, Том 1. СПб.: ГЭТУ, 2012. С.49–53.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ ПО СПЕКТРУ ОТРАЖЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Д.А. Усанов, А.Э. Постельга

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

E-mail: usanovda@sgu.ru

Введение

Использование контактных зондовых методов для определения электропроводности часто связано с разрушением исследуемого материала, кроме того, при контакте металлического зонда с полупроводником возможна инжекция носителей заряда в материал, возникновение контактной разности потенциалов и термоЭДС, что в свою очередь приводит к трудноустраняемым и трудноучитываемым источникам погрешностей при измерениях. Этим недостатком лишены бесконтактные методы.

Известны работы, в частности [1], где отмечается невозможность определения комплексной диэлектрической проницаемости бесконтактными неразрушаемыми СВЧ-методами при неизвестной толщине образца. Это обусловлено существованием при фиксированной температуре T сочетаний различных значений толщины d и электропроводности σ , при которых наблюдается одинаковая частотная зависимость коэффициента отражения сверхвысокочастотного излучения [2].

В настоящей работе показана возможность решения задачи по определению энергии активации примеси, а также электропроводности и толщины слоя полупроводника в интервале температур от 180 до 310 К. В результате решения соответствующей обратной задачи ставится цель: определение функции, описывающей искомую температурную зависимость электропроводности.

Для нахождения значений d_{mn} и σ по спектру отражения $R_{\text{exp}}(\omega_j)$ СВЧ-излучения использовался метод наименьших квадратов [3]. Для его реализации необходимо найти такие пары значений параметров d_{mn} и σ , при которых минимизируется сумма квадратов отклонений экспериментальных и теоретически рассчитанных значений $|R|^2$. Для этого необходимо составить функцию «невязок»:

$$S(\sigma, d_{mn}) = \sum_{j=0}^1 \sum_i \left[\left| R_{\text{teor}}(\omega_i, \sigma, d_{mn}, T_j) \right|^2 - \left| R_{\text{exp}}(\omega_i, T_j) \right|^2 \right]^2,$$

где $j=0$ при температуре T_0 , $j=1$ при температуре T .

Глобальный минимум зависимости $S(\sigma, d_{mn})$ можно найти, например, решая систему уравнений, определяемых из условия равенства частной производной функции $S(\sigma, d_{mn})$ по неизвестным параметрам:

$$\begin{cases} \frac{\partial S(\sigma, d_{nn})}{\partial \sigma} = 0, \\ \frac{\partial S(\sigma, d_{nn})}{\partial d_{nn}} = 0 \end{cases}$$

При исходной толщине слоя кремния (360 мкм) абсолютное изменение толщины при изменении температуры на 10 К составляет 8.4 нм, а абсолютное изменение толщины слоя фторопласта при его начальной толщине 3 см составляет 3мкм. Поэтому пренебрежение зависимостью толщин слоёв от температуры в рассматриваемом случае является вполне обоснованным.

Было замечено, что экспериментально определённая температурная зависимость (в интервале 270-300К) $\sigma(T)$ отличается от кривой, рассчитанной в приближении постоянной концентрации. Данное отличие составляет единицы процентов, но ввиду большой избыточности данных, по которым проводилось решение обратной задачи, точность производимых измерений была достаточна для наблюдения такого отклонения.

При определении параметров, определяющих зависимость $\sigma(T)$, использовался следующий её вид:

$$\sigma(T) = \frac{1}{a' \cdot T^{-3/2} + b' \cdot T^{3/2}} \cdot \exp(-\Delta W' / (2 \cdot k \cdot T)) + \sigma' \quad (1),$$

где a' , b' , $\Delta W'$, σ' подлежали определению по описанному выше методу. В результате были получены следующие значения этих параметров: 0.774 $\text{Ohm} \cdot \text{cm} \cdot \text{K}^{3/2}$, $5.153 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm} \cdot \text{K}^{-3/2}$, 0.0125 eV, $0.1017 \text{ Ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$, соответственно. Данные значения получены при уровне среднеквадратичного отклонения экспериментально определенных и рассчитанных значений электропроводности $0.00033 \text{ Ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$.

Полученное в результате решения обратной задачи в диапазоне температур 270-300К, значение $\Delta W'$ составило 0.0125 eV, что 4 раза меньше значения энергии активации сурьмы в кремнии ΔW , полученного в диапазоне температур 180-190К. Известно, что для водородоподобной модели примесного центра соотношение для энергии активации возбужденных уровней имеет вид:

$$\Delta W_n = \Delta W / n^2,$$

где n – квантовое число, определяющее различные уровни возбуждения донорной примеси ($n \geq 1$), ΔW – энергия активации основного состояния донора. Можно предположить, что в указанном диапазоне температур наблюдается ионизация примесных центров уровня возбуждения, характеризуемого $n = 2$.

На рис. 1 приведены температурные зависимости электропроводности: 1 – значения, определенные в ходе решения обратной задачи; 2 – значения рассчитанные по соотношению

$$\sigma(T) = \sigma_{02} \cdot \exp(-\Delta W / (2 \cdot k \cdot T)),$$

где σ_{02} – принимается постоянной для данного интервала температур, ΔW – энергия активации примеси, k – постоянная Больцмана, T – температура; 3 – значения рассчитанные по соотношению $\sigma(T) = 1/(a \cdot T^{-3/2} + b \cdot T^{3/2})$, где a и b – константы, значения которых были определены в ходе решения обратной задачи; 3 – значения рассчитанные по соотношению (1). Участками «a», «b», «c» выделены области $\sigma(T)$, соответствующие интервалам температур: 130-145К, 145-237 К, 273-300К. На вставке с приведен участок «c» с увеличенным масштабом.

Из рис. 1 видно, что соотношение (1) хорошо описывает наблюдаемое в эксперименте изменение полупроводникового слоя в диапазоне температур 273-300К. Это соотношение можно считать универсальным для описания вида зависимости электропроводности полупроводника от температуры при значениях, входящих в него констант, отличающихся для различных интервалов температур.

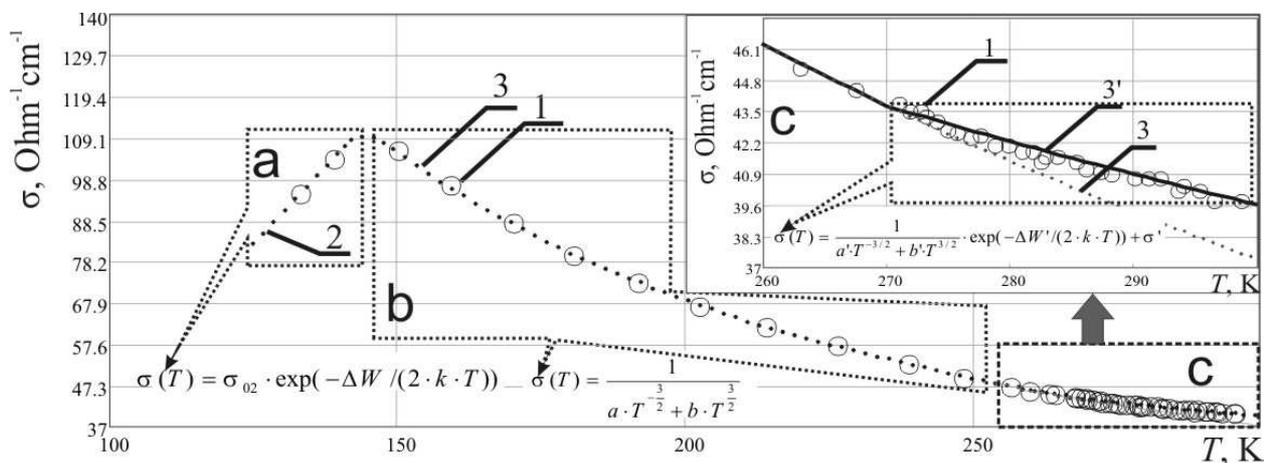


Рис. 1. Температурная зависимость электропроводности

Таким образом, была показана возможность одновременного измерения нескольких параметров полупроводникового слоя в широком интервале температур при заданной функции, определяющей характер их температурной зависимости. Установлена особенность в характере изменения электропроводности слоя кремния в интервале температур 273–300 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. Крючков Ю.Н., Лепорский А.Н. Измерение диэлектрической проницаемости диэлектриков при одностороннем доступе к изделию. – Дефектоскопия, Екатеринбург. 1977. №5. С. 134-136.
2. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Сысоев Н.Ю. Определение электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения. Изв. вузов. Электроника, 2011, №4(90), С. 71-77.

3. *Ronald F. Bauer and Paul Penfield, Jr. De-Embedding and Unterminating. IEEE Transactions on microwave theory and techniques V. mtt-22. №3. 1974. P. 76-79.*

СГЛАЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИНТЕРФЕЙСНОГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКИ ОПТИЧЕСКИМ ОБЛУЧЕНИЕМ ИЗ ОБЛАСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА

С.В.Стецюра, И.В.Маляр, А.В.Козловский, М.С.Буланов

Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского

E-mail: kozlowsky@bk.ru

Гибридные структуры на основе полупроводниковой подложки и полимерного интерфейсного покрытия являются перспективными для создания био- и хемосенсоров потенциометрического типа [1], но при этом недостаточно изучены. Поскольку полиэлектролитные молекулы в растворе обладают эффективным зарядом, то для создания таких структур используют технологию Ленгмюра-Блоджетт, либо технологию полиионной сборки [2]. Имеется ряд работ с предложением подобных сенсорных структур (и методов их создания) для детекции ДНК [3], холестерина [4] и др.

Использование полупроводника увеличивает возможности управления параметрами датчика и позволяет создавать автоматизированные комплексы, сопрягая биочипы с устройствами твердотельной электроники. Необходимость использования органического интерфейса обусловлена тем, что без его наличия нано- и биообъекты плохо адсорбируются на поверхности полупроводника. В то же время из-за неоднородности полимерного покрытия ухудшается чувствительность датчика, т.к. первоначальная неоднородность покрытия уже вносит изменения в определяемый сигнал.

В работе [5] представлены результаты изменения свойств полиэлектролитных молекул при облучении Si, на который они адсорбировались из раствора. Дело в том, что при освещении Si излучением с длинами волн из области его чувствительности, происходит генерация электронно-дырочных пар, которые разделяются ОПЗ так, что часть электронов туннелирует на границы раздела «SiO₂-Si» и «SiO₂-органический слой», изменяя поверхностную плотность заряда и тем самым влияя на конформацию осаждаемых полиэлектролитных молекул (рис.1).

В данной работе была повторена технология создания структур, описанных в [5]. Для управления адсорбцией использовалось освещение подложек с помощью галогенной лампы с максимальной интенсивностью освещения 3500 лк. В качестве полиэлектролита использовался катионный полиэлектролит полиэтиленимин (ПЭИ).

Для оценки сглаживания электрической и топологической неоднородностей полученного слоя ПЭИ, использовались методы атомно-силовой мик-

роскопии (АСМ) и зонда Кельвина (СМЗК). Измерения АСМ производились в полуконтактном режиме. Все измерения были проведены на зондовой станции *NTEGRA Spectra (NT-MDT, Россия)*. Были использованы кантилеверы с проводящим покрытием *NSG11/Pt*. Скорость сканирования 0,5 Гц.

На рис. 2 показаны распределения высот неровностей поверхности Si и распределение поверхностного потенциала. Слой ПЭИ, осажденный при освещении, имеет шероховатость и толщину меньшую на 30-50 %, чем «темновой» слой. Однородность электрофизических параметров поверхности при «световом» нанесении ПЭИ увеличивается до 30%.

Для определения количества адсорбированного ПЭИ использовался Оже-анализ (рис.3). Для его проведения использовалась установка Perkin-Elmer РН 4300. Количество точек, в которых измерялись Оже-спектры, составило не менее 12 на каждой анализируемой поверхности. Анализ проводился при следующих параметрах измерения: ускоряющее напряжение для первичных электронов 3 кВ; диапазон регистрируемых энергий: 30-700 эВ с шагом 1 эВ. Спектр в каждой точке является усредненным по 3 измерениям. По площади выбранного участка (сканирование $500 \times 500 \text{ мкм}^2$) регистрировался Оже-пик, характерный для азота.

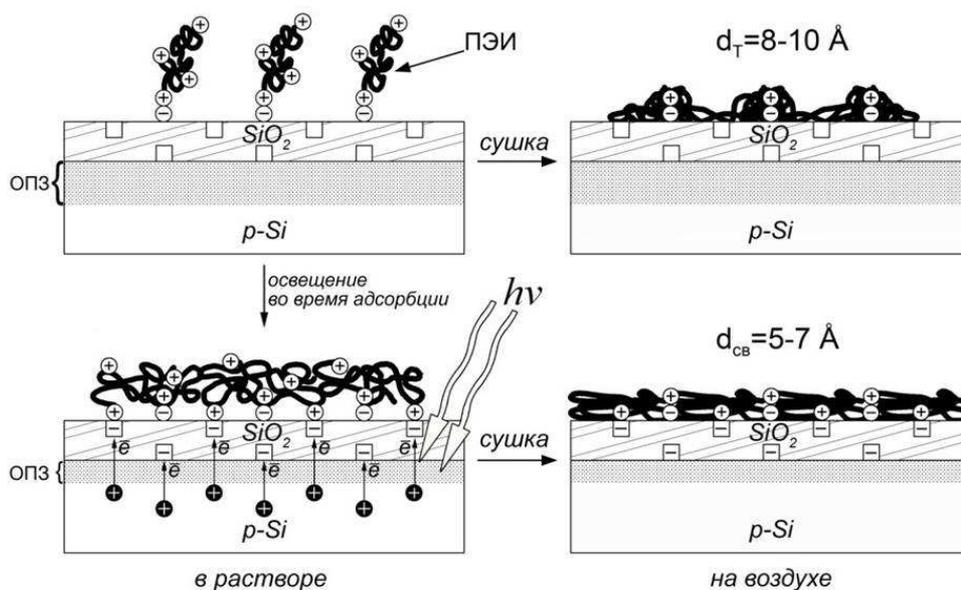


Рис.1 Схематичные изображения, иллюстрирующие механизмы повышения однородности по толщине осажденного поликатионного покрытия при освещении полупроводниковой структуры во время адсорбции полимера

Площади под кривыми на рис. 3 пропорциональны количеству молекул ПЭИ на сканируемых поверхностях. Расчет показал равенство (с учетом погрешности) количества вещества (ПЭИ), находящегося на сканируемых участках полиэлектролитных покрытий, полученных в темноте и при освещении Si во время адсорбции. Это подтверждает, что механизм уменьшения толщины покрытия ПЭИ при освещении по сравнению с темновым нанесением не является десорбционным. Также это означает более плотную упаковку полиэлектролитных молекул, адсорбируемых на Si при освещении.

Таким образом, слой полиэлектролита, адсорбируемый при освещении полупроводниковой подложки, более однородный по морфологии (на 30-50%, метод АСМ), распределению поверхностного потенциала (до 30%, метод Кельвин-потенциала) и по химическому составу (до 50%, метод Оже-сканирования).

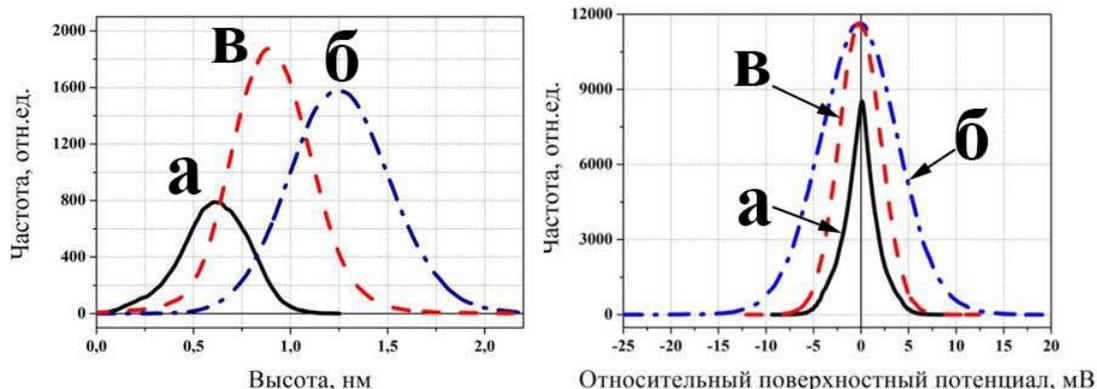


Рис.2 Слева - Распределение высот неровностей поверхности кремниевой подложки после перекисно-аммиачной обработки (а), подложки со слоем ПЭИ, осаждённого в темноте (б) и при освещении (в); Справа – распределение поверхностного потенциала (обозначения те же, что и у распределения высот)

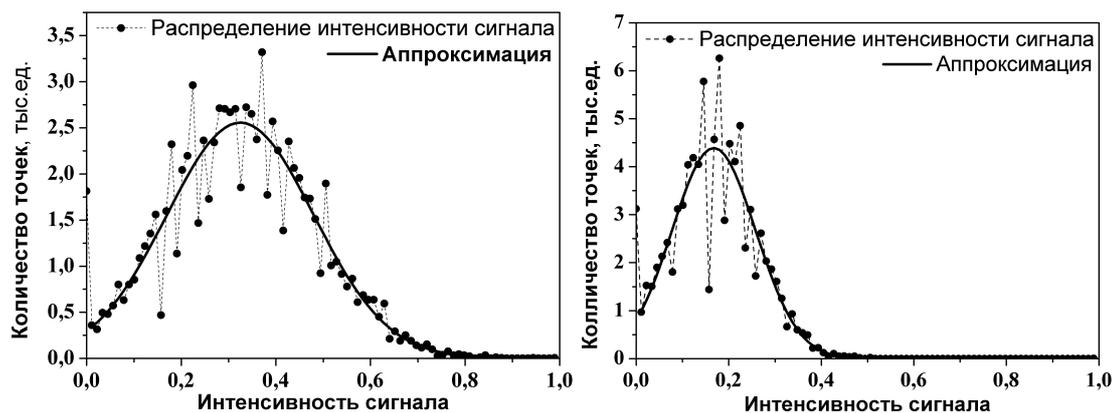


Рис.3 Распределения интенсивности пика по азоту: слева – ПЭИ нанесен в темноте; справа – ПЭИ нанесен при освещении. Ширина пика коррелирует с однородностью распределения ПЭИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-02-31089-мол_а).

Библиографический список

1. Gil Shalev, Ariel Cohen, Amihod Doron, Andrew Machauf, Moran Horesh, Udi Virobnik, Daniela Ullien, Ilan Levy Standard CMOS Fabrication of a Sensitive Fully Depleted Electrolyte-Insulator-Semiconductor Field Effect Transistor for Biosensor Applications // Sensors, 2009, V.9. P. 4366-4379; doi:10.3390/s90604366
2. Голосова А. Тонкие полимерные пленки на основе мультислойной сборки // Наноиндустрия. 2007. №4. С. 34-36.
3. Fritz J., Cooper E.B., Gaudet S., Sorger P.K., Manalis S.R. Electronic detection of DNA by its intrinsic molecular charge // PNAS. 2002. V. 99. №22. P. 14142–14146.
4. Hitoshi Ohnuki, Rikimaru Honjo, Hideaki Endo, Tatsuro Imakubo, Mitsuru Izumi. Amperometric cholesterol biosensors based on hybrid organic–inorganic Langmuir–Blodgett films // Thin Solid Films. 2009. V. 518 P. 596–599.

5. *Malyar I.V., Gorin D.A., Santer S., Stetsyura S.V.* Photocontrolled Adsorption of Polyelectrolyte Molecules on a Silicon Substrate // *Langmuir*.2013. V.29 (52), P. 16058–16065.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ(ДВУХСЛОЙНЫХ) НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛ-**J**-АГРЕГАТ С ПЛАЗМОННЫМ РЕЗОНАНСОМ (КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Н.Ш. Гимадеев, В.Ф. Названов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: gimadeev.niyaz@gmail.com; vasily.nazvanov@sgu.ru

Уникальные оптические свойства наночастиц благородных металлов, обусловленные локализованным плазмонным резонансом, в настоящее время широко используются в различных технических приложениях: одноэлектронные транзисторы, оптическая микроскопия, создание маркеров для электронной микроскопии, твердофазный иммуноанализ, биосенсоры, генные чипы, создание светоизлучающих устройств и лазеров таких как спазер (SPASER)[1-4].

Оптические свойства наночастиц могут быть значительно модифицированы с использованием слоев органического красителя в **J**-агрегатном состоянии[5-6].

J-агрегаты – это нанокластеры нековалентно связанных органических молекул красителя, характеризующихся высокой степенью упорядоченности, в которых электронные возбуждения отдельных молекул благодаря трансляционному порядку обобществляются, образуя френкелевские экситонные состояния[7-8].

В данной работе в результате компьютерного моделирования в квазистатическом приближении с использованием пакета программ MathCad получены спектры поглощения двухслойных наночастиц с металлическим ядром, покрытым оболочкой из **J**-агрегатов. В качестве металла использовалось золото, а оболочки три различных **J**-агрегата(**J**-агрегаты красителей ТС, ОС, РС [6]. Значения использованных параметров указаны в таблице 1,2.

Таблица 1 Параметры **J**-агрегатов цианиновых красителей:

| Краситель | ω_0 (эВ) | λ_0 (нм) | f | G(эВ) |
|-----------|-----------------|------------------|------|-------|
| ТС | 2.68 | 462.6 | 0.90 | 0.066 |
| ОС | 3.04 | 407.2 | 0.01 | 0.039 |
| РС | 2.13 | 582.1 | 0.10 | 0.033 |

Таблица 2 Параметры металлов:

| Металл | ϵ | ω_p (эВ) | γ (эВ) |
|--------|------------|-----------------|---------------|
| золото | 12 | 9.49 | 0.0708 |

Были рассмотрены изменения картины спектров поглощения под влиянием J-агрегата, перестройка спектров при различных параметрах.

В качестве примера на рис. 1 представлены спектры поглощения частиц из золотого ядра, покрытого слоем J-агрегата(ОС), для разных радиусов.

Как можно видеть из рисунка, кроме пика, связанного с локализованным плазмонным резонансом в металлической частице, появляются дополнительные пики, в результате взаимодействия экситонов оболочки из J-агрегата с плазмонами ядра.

В данной работе впервые было выполнено моделирование спектров поглощения наночастиц состоящих из J-агрегатов покрытых слоем благородного металла(золото). На рис.2 представлены результаты моделирования для системы J-агрегат(ОС)/Au. Как можно видеть из рисунка, также видно два максимума, что говорит о взаимодействии экситонов в J-агрегате с плазмонами в металле

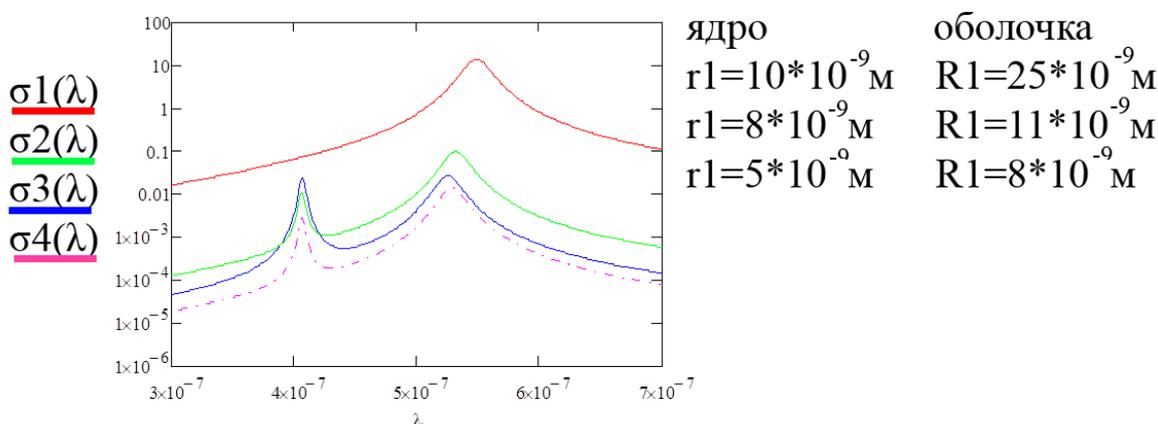


Рис. 1. Спектры поглощения наночастицы Au/J-агрегат(ОС) для разных радиусов

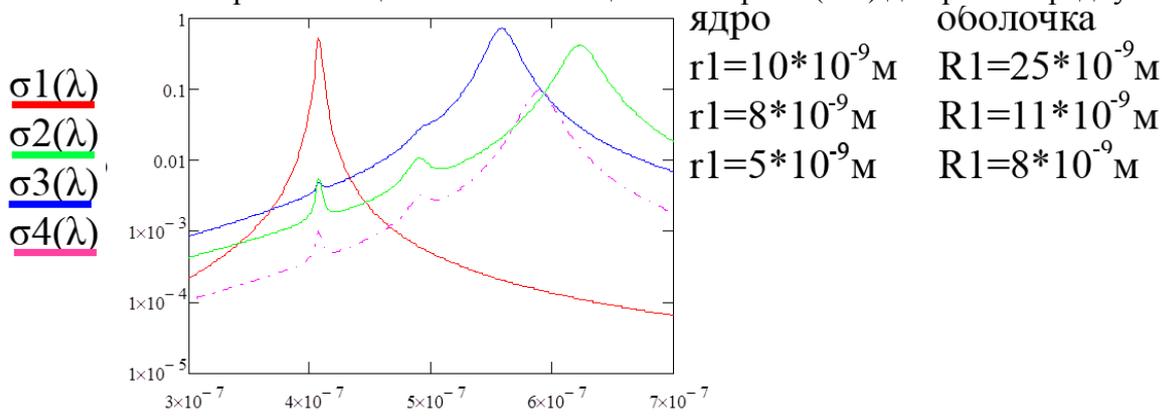


Рис. 2. Спектры поглощения наночастицы J-агрегат(ОС), покрытых Au для разных радиусов

Библиографический список

1. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.:Мир, 1986. 467 с.
2. Климов В. В. Наноплазмоника // Успехи физических наук. 2008. Т. 178 №8 С. 875-880.
3. Климов В. В. Наноплазмоника. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009. 480 с.
4. Хлебцов Н. Г. Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом.// Квантовая электроника. 2008. Т.38. №6. С. 504-527.

5. *Лебедев В. С., Медведев А. С.* Оптические свойства композитных наночастиц благородных металлов, покрытых мономолекулярным слоем J-агрегата органического красителя // Квантовая электроника. 2010. Т.40. №3. С. 246-253.
6. *Лебедев В. С., Медведев А. С.* Эффекты плазмон-экситонного взаимодействия при поглощении и рассеянии света двухслойными наночастицами металл/J-агрегат // Квантовая электроника. 2012. Т.42. №8. С. 701-713.
7. *Бельтюгов В.Н., Шелковников В. В.* Наблюдение режима сильной экситон-фотонной связи при комнатной температуре в микрорезонаторе, содержащем J-агрегаты псевдоизоцианина // Оптический журнал. 2004. Т. 71. №6. С. 88-92.
8. *Шелковников В. В., Плеханов А. И.* Нанометровые пленки полиметиновых красителей в оптической памяти и нелинейной оптике // Российские нанотехнологии. 2008. Т.3. №9-10. С. 36-37,52-57.

О ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ В СРЕДНЕМ И ДАЛЬНЕМ ИК ДИАПАЗОНАХ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОГО РЕЗОНАНСА

А.Г. Роках, М.И. Шишкин, М.Д. Матасов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: rokakhag@mail.ru

Обсуждается возможность использования плазменного резонанса в полупроводниках в средней и дальней инфракрасной (ИК) области спектра для возбуждения внешнего фотоэффекта (туннельной фотоэмиссии) при комнатной температуре. В качестве модельного вещества используются осажденные в вакууме радиационно-стойкие пленки ограниченных твердых растворов CdS-PbS, для которых приводятся спектры оптического отражения в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах, содержащие минимум, связанный с плазменным отражением. На этих пленках в процессе активирующего отжига формируются выступы узкозонной фазы субмикронных размеров (острия), облегчающие фотоэмиссию. На основе сравнения между собой плазменного резонанса в полупроводнике, плазмонного резонанса вторичной электронной эмиссии, а также вторично-ионного фотоэффекта делается вывод о возможности превращения «чисто оптического» [1] явления плазменного резонанса в средней и дальней ИК области спектра во внешний фотоэффект при комнатной температуре.

Следует отметить, что минимум отражения в той же спектральной области (рис. 1а) наблюдался на аналогично приготовленных пленках CdS-CdSe и связывался с плазменным резонансом носителей заряда [2]. В упомянутой работе исследовалась проводимость поликристаллических пленок селенида и сульфоселенида кадмия в широкой области частот: от нулевой до оптической и была предложена модель проводящих включений с высокой концентрацией квазисвободных носителей заряда, разделенных высокими потенциальными барьерами. Такая модель объясняла высокую элек-

тропроводность на оптических частотах и низкую – на малых частотах и постоянном токе.

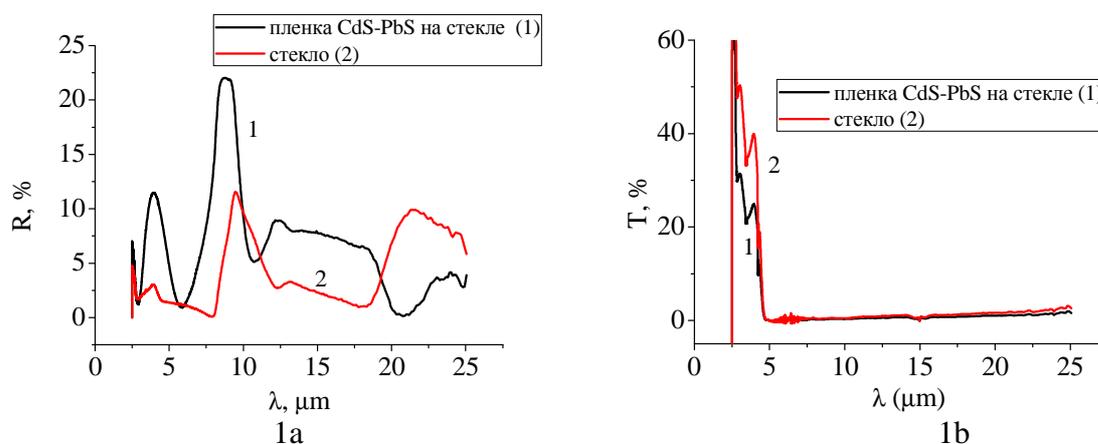


Рис. 1. Оптическое отражение (1a) и пропускание (1b) пленки CdS(0,9)-PbS(0,1) толщиной 1 мкм, полученной сублимацией в вакууме на стеклянную подложку.

Связь круговой частоты ω частоты плазменного резонанса с концентрацией свободных носителей заряда N дается в виде [3].

$$\omega^2 = \frac{Nq^2}{m^* \epsilon_0 \epsilon}. \quad (1)$$

Здесь m^* - эффективная масса электрона, ϵ - диэлектрическая проницаемость полупроводника (будем полагать, что это «чистый» CdS), q - заряд электрона, ϵ_0 - электрическая постоянная. Оценка концентрации свободных носителей для длины волны плазменного резонанса $\lambda = 10$ мкм, например, дает величину N порядка 10^{18} см⁻³. Рассчитанная величина концентрации свободных носителей заряда, которую традиционно связывают с концентрацией мелких доноров, представляется достаточно высокой, поскольку концентрация центров с глубокими уровнями в этих пленках, измеренная различными методами, обычно не превышает 10^{16} - 10^{17} см⁻³. Не касаясь вопроса о происхождении наблюдаемой высокой концентрации, который может послужить темой отдельного исследования, отметим вслед за статьей [2], что места локализации высокой концентрации должны быть разделены высокими потенциальными барьерами. Величина возможной электронной эмиссии на исследуемых пленках зависит от рельефа поверхности, сведения о котором дают исследования на электронном микроскопе.

На левой фотографии рис. 2, сделанной во вторичных электронах, узкозонная фаза выглядит светлее фона, поскольку в ее состав входит более тяжелый элемент (свинец) который уменьшает глубину проникновения первичных и таким образом увеличивает выход вторичных электронов. Еще сильнее подобная ситуация проявляется на отраженных электронах. Эта ситуация подтверждается и профилем масс, измеренном на оже- и масс-спектрометре Perkin-Elmer PHI SAM 4300 (здесь не приводится), свидетельствующем об обогащении поверхностного слоя исследуемой пленки свинцом. Электронно-микроскопические фотографии пленок CdS-PbS по-

казывают наличие на их поверхности кристаллитов размером в доли микрона и несколько микрон, которые могли бы служить остриями для туннельной эмиссии. Отметим, что рассматриваемые пленки обладают радиационной стойкостью [4].

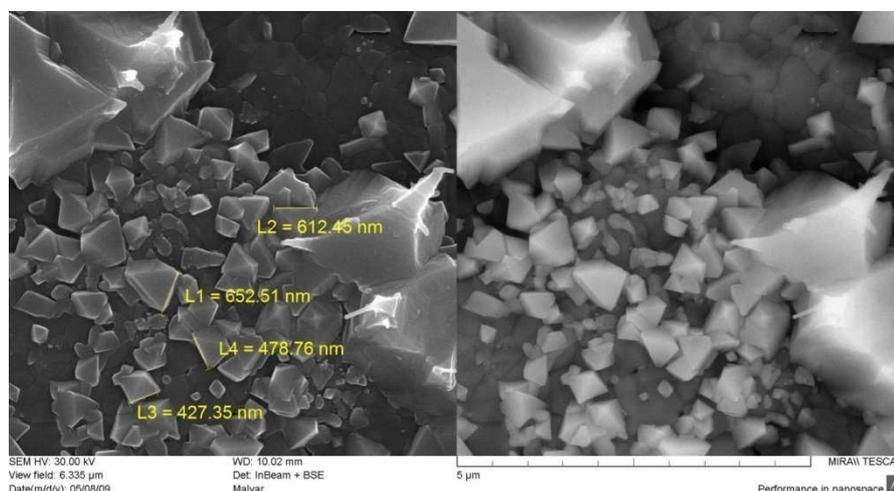


Рис. 2. Изображение поверхности пленочной мишени состава CdS(0,9)-PbS(0,1) на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira II LMU в двух датчиках: вторичных электронов (слева) и отраженных электронов (справа).

Ситуация с продвижением электронной эмиссии в инфракрасную область спектра видна на примере неохлаждаемых ПНВ с эмиссией электронов в вакуум: их продвижения в среднюю и дальнюю ИК области спектра с использованием традиционных механизмов работы, по-видимому, не ожидается, хотя отмечается такое их важное преимущество как практическая безынерционность [5]. В данной работе проведено предварительное исследование возможности фотоэмиссии для среднего и дальнего ИК диапазонов на основе плазменного резонанса или взаимодействия плазменных резонансов, имеющих место как при воздействии ИК излучения, так и под влиянием ускоренных электронов (характеристические потери).

Библиографический список

1. Роках А.Г., Жуков А.Г., Сердобинцев А.А., Стецюра С.В. Особенности вторичной ионной масс-спектрометрии полупроводникового образца при освещении // Физика полупроводников и полупроводниковая электроника. Сборник статей. Саратов: Изд-во Гос. УНЦ «Колледж». 2001. С. 56-62.
2. Роках А.Г., Кац Н.Б. Плазменный резонанс в пленках селенида кадмия // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5 В. 1. С. 6-10.
3. Биленко Д.И. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Плазменный резонанс свободных носителей заряда в полупроводниках. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. С.44.
4. Роках А.Г. Варизонная модель полупроводника стойкого к деградации // Письма в ЖТФ. 1984.В. 13. С. 820–824.
5. В.П. Бегучев, А. Л. Чапкевич, А. М. Филачев. Электронно-оптические преобразователи. Состояние и тенденции развития // Прикладная физика, 1999. № 2. С. 132–139.

СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУР МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК (J-АГРЕГАТ) НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНАХ (КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

П.Г. Сычев, В.Ф. Названов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: sychev-pavel@yandex.ru ; vasily.nazvanov@sgu.ru

В современной науке интерес к поверхностным плазмонам обусловлен возможностью обширного применения этого явления как при моделировании и решении ряда задач современной нанооптики, так и для последующего проектирования оптоэлектронных устройств на поверхностных плазмонах. Уникальные свойства поверхностных плазмонов позволяют описывать это явление как одно из перспективнейших направлений развития нанооптики [1-4].

В последние годы значительный интерес представляют исследования взаимодействия поверхностных [5-6] и локализованных [6] плазмонов с экситонами в органических соединениях.

В частности, на наш взгляд, весьма актуальным является исследование спектров отражения структур металл - J-агрегат на поверхностных плазмонах вследствие проявления эффектов взаимодействия поверхностных плазмонов с френкелевскими экситонами J-агрегатов органических красителей.

В данной работе проведено компьютерное моделирование спектров отражения структур стекло - металл – J-агрегат - вода на поверхностных плазмонах (в геометрии Кречмана). В ходе данного анализа проведено моделирование зависимостей коэффициента отражения от различных параметров. Моделирование проведено при использовании пакета программ MathCAD, где коэффициент отражения структур рассчитывался при использовании формул Френеля [5] для четырехслойной структуры и представляет собой три задачи, в которых в качестве третьего слоя взяты три разновидности цианиновых красителей: ТС, ОС и РС. При расчете спектров отражения данных структур были использованы законы дисперсии для металла и красителей [6].

Таблица 1. Параметры цианиновых красителей. Где: E_0 – частота перехода, соответствующая центру полосы поглощения; γ - ширина контура; f - приведенная сила осциллятора [6].

| Краситель | E_0 (Эв) | γ (Эв) | f | λ (нм) |
|-----------|------------|---------------|------|----------------|
| ТС | 2,68 | 0,066 | 0,9 | 462,6 |
| ОС | 3,04 | 0,039 | 0,01 | 407,2 |
| РС | 2,13 | 0,033 | 0,1 | 582,1 |

В работе проведено моделирование для указанных структур, как для разных толщин слоев красителя, так и для разных углов падения излучения. В

качестве примера на рисунке 1 представлен спектр коэффициента отражения четырехслойной структуры (стекло - металл – J-агрегат – вода) при разных углах падения излучения.

Как можно видеть из представленного рисунка, при использовании красителя J-агрегат в качестве одного из слоев в структуре с поверхностными плазмонами, в спектрах отражения наблюдаются два минимума, один из которых обусловлен плазмонным резонансом, другой - взаимодействием поверхностных плазмонов с экситонами красителя ТС.

В частности, по рисунку при угле $\Theta = 80^\circ$, можно оценить величину расщепления Раби [5-9] = 0,095 Эв.

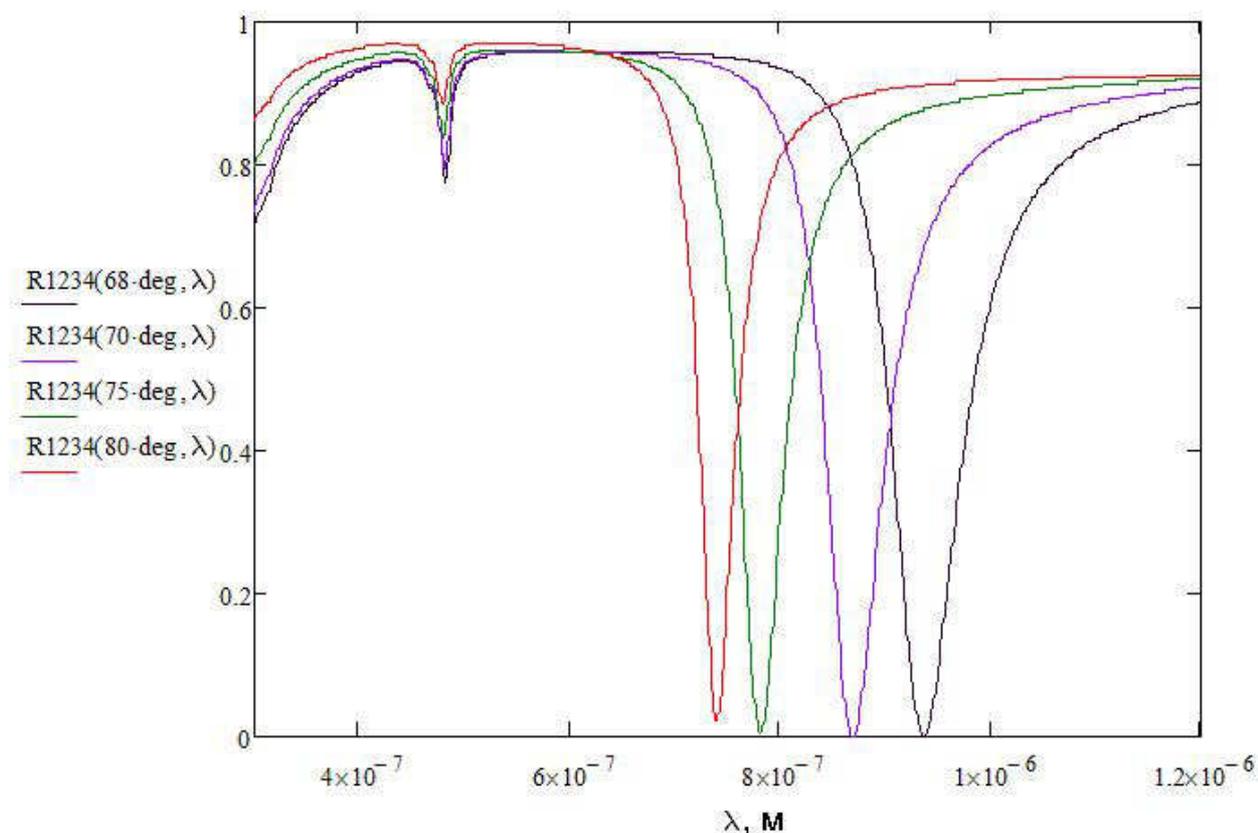


Рис. 1. Спектр коэффициента отражения в зависимости от длины волны падающего излучения при разных углах Θ . 4 слоя. (J-агрегат ТС).

Библиографический список

1. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред. // Под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Миллса. – М. : Наука, 1985. 528 с.
2. Климов В.В. Наноплазмоника. -- М.:ФИЗМАТЛИТ. 2009. 480 с.
3. Либенсон М.Н. Поверхностные электромагнитные волны в оптике. // Сорос. Образ. Журнал. 1996. №11. С. 103-110.
4. Либенсон М.Н. Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона. // Сорос. Образ. Журнал.- 1996. № 10. С. 93-98.
5. de Bruijn Helene E., Kooyman Rob P.H. , and Greve J. // Optics Communications. -1991. P. 425-432.
6. Лебедев В. С., Медведев А. С. Эффекты плазмон-экситонного взаимодействия при поглощении и рассеяния света двухслойными наночастицами металл/J-агрегат // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 8. С.701-717.

7. *Symonds C., Bonnard C., Plenet J. C., Brehier A., Parashkov R., Lauret J. S., E Deleporte and Belessa J.* Particularities of surface plasmon–exciton strong coupling with large Rabi splitting // *New Journal of Physics* 2008. Vol.10. 065017 (11).
8. *Belessa J., Bonnard C., and Plenet J.C.* Strong Coupling between Surface Plasmons and Excitons in an Organic Semiconductor // *Physical revivе letters*. 2004. Vol. 93. №3. P. 036404.
9. *Лебедев В. С., Медведев А. С.* «*Оптические свойства трехслойных металлоорганических наночастиц с внешней оболочкой молекулярных J-агрегатов*» // *Квантовая электроника*. 2013. Т. 43. №11. С. 1065-1077.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК СУЛЬФИДОВ КАДМИЯ И СВИНЦА

С.В. Стецюра, П.Г. Харитонов, И.Ю. Стецюра, М.С. Буланов
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: haritonovapg@gmail.com

Соединения $A^{II}B^{VI}$ являются перспективными материалами для создания полупроводниковых приборов с улучшенными параметрами и расширенными функциональными возможностями. Это связано главным образом с тем, что соединения этой группы обладают различными значениями ширины запрещенной зоны и образуют взаимные твердые растворы, что позволяет варьировать их электрические, фотоэлектрические и оптические свойства. Одним из наиболее значимых материалов этой группы является сульфид кадмия (CdS). Многие практические задачи, связанные с использованием соединений $A^{II}B^{VI}$, требуют получения этих материалов в виде тонких пленок до 1 -2 мкм толщиной. Тонкие пленки на основе CdS являются распространенными люминофорами и фотопроводниками. В связи с этим в настоящее время уделяется большое внимание изучению дешевых воспроизводимых методов получения тонких пленок CdS-PbS, например, методом гидрохимического осаждения [1].

Целью данной работы является сравнительный анализ спектров фотолюминесценции (ФЛ) пленок CdS и CdS-PbS, полученных методами гидрохимического осаждения и термического испарения в вакууме для установления возможной конкурентоспособности первого метода. Необходимо отметить, что тонкие пленки, полученные термическим испарением в вакууме, достаточно хорошо изучены [2], в частности, было установлено, что данные пленки CdS-PbS обладают высокой радиационной стойкостью к электронному облучению, пониженной фотоутомляемостью и проявляют эффект малых доз при облучении электронами дозами до 10^9 рад.

В настоящей работе исследовались люминесцентные характеристики поликристаллических пленок твердых растворов CdS-PbS при соотношении компонент 9:1 и плёнок, исходная шихта которых содержала «чистый» CdS:CuCl₂, полученных методом термического испарения. Также исследовались пленки твердых растворов CdS-PbS, полученных методом гидрохими-

ческого осаждения, с разным процентным содержанием компонент, причем для сравнительного анализа с образцами из первой группы были выбраны пленки с содержанием 87,5% CdS, 12,5 % PbS и образцы без PbS.

На рисунках 1 и 2 представлены спектры ФЛ для различных составов образцов, полученных методом гидрохимического осаждения, до и после электронного облучения. В таблице 1 представлены параметры, характеризующие длину волны основного пика ФЛ до и после электронного облучения, а также изменение соотношения интенсивностей основного пика и длинноволнового излучения, характеризующего дефектность и степень кристалличности структуры образцов. Регистрация спектров ФЛ проводилась спектрометром Solar-TII, являющимся частью установки Ntegra Spectra (NT-MDT, Россия). ФЛ получали с помощью возбуждения лазером с длиной волны 473 нм в течение 0,5 секунд, мощность лазера соответствовала установленному фильтру 0,1 мВт. Облучение электронами с энергией 3 кэВ для установления радиационной стойкости образцов проводилось на установке Perkin-Elmer РНІ 4300 при наборе дозы облучения равной 10^9 рад.

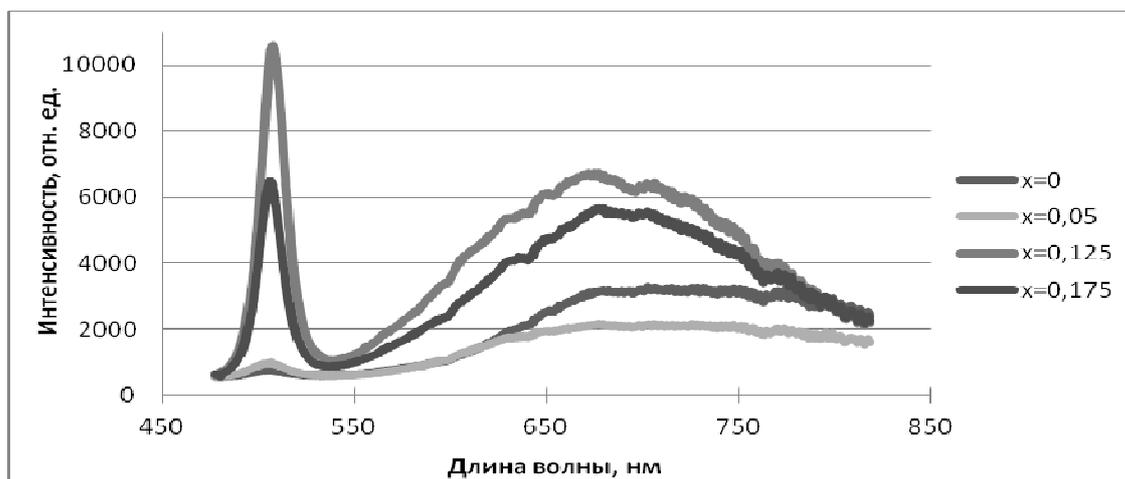


Рис.1. Спектры ФЛ образцов $Cd_{1-x}Pb_xS$ до электронного облучения

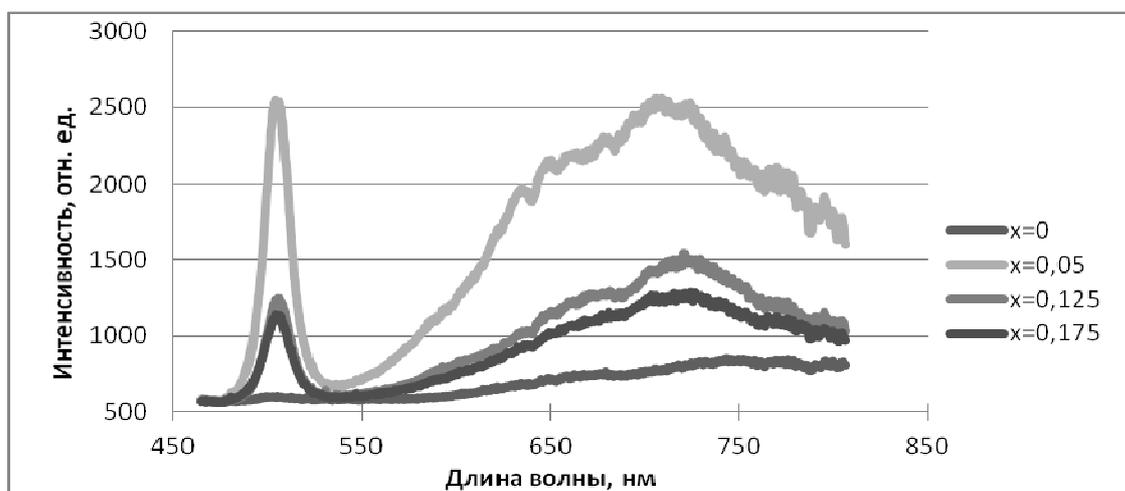


Рис. 2. Спектры ФЛ образцов $Cd_{1-x}Pb_xS$ после электронного облучения

Табл.1. Параметры образцов $Cd_{1-x}Pb_xS$ до и после электронного облучения

| | Соотношение между пиками $I_{\text{длинноволн.}}/I_{\text{коротковолн.}}$ | | Коротковолновая граница длинноволнового пика, нм | | Длина волны, соответствующая основному пику ФЛ | |
|-------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|
| | до электронного облучения | после электронного облучения | до электронного облучения | после электронного облучения | до электронного облучения | после электронного облучения |
| 1.(x=0) | 4 | 1,4 | 577 | 567 | <u>504</u> | <u>500</u> |
| 2.(x=0,05) | 2,2 | 1 | 567 | 542 | <u>503</u> | <u>504</u> |
| 3.(x=0,125) | 0,6 | 1,2 | 542 | 541 | <u>506</u> | <u>505</u> |
| 4.(x=0,175) | 0,85 | 1,1 | 544 | 539 | 505 | 504 |

Как видно из таблицы 1, после электронного облучения на образцах с включениями PbS произошло незначительное изменение диапазона чувствительности и длины волны максимума основного пика ФЛ (λ_{max} сдвинулась в коротковолновую область на 1 нм). На образцах без PbS после облучения λ_{max} сдвинулась в коротковолновую область на 4 нм.

Спектральные характеристики образцов, полученные методом термического испарения, для сравнения их радиационной стойкости с исследуемыми образцами были взяты из работы [2]. В данной работе было показано, что на образцах с PbS после облучения электронами длина волны, на которой наблюдался максимум ФЛ, осталась неизменной ($\lambda_{\text{max}} = 575$ нм), в то время как на образцах без узкозонной компоненты произошло резкое уменьшение длины волны, соответствующей основному пику ФЛ (λ_{max} сдвинулась в коротковолновую область на 20 нм). Доза и параметры электронного облучения соответствовали проведенному нами эксперименту.

Меньшая радиационная стойкость «чистого» CdS, полученного термическим испарением, связана с тем, что при гидрохимическом осаждении получают структуры с более высокой разупорядоченностью, так как образование пленки происходит на воздухе, в результате чего образуется большее количество дефектов, в том числе, центры, связанные с кислородом. Для образцов CdS-PbS, полученных методом термического испарения в вакууме, не наблюдается преобладания длинноволнового пика над основным в отличие от спектров ФЛ образцов, полученных методом гидрохимического осаждения, что подтверждает меньшую разупорядоченность структур, полученных термическим испарением. Известно, что, степень структурного совершенства материала влияет на его радиационную стойкость: если структура сильно разупорядочена (состояние ближе к аморфному или крипнокристаллическому), то характеристики образцов изменяются незначительно. Это объясняет полученные результаты для «чистого» CdS. Чуть меньшая радиационная стойкость CdS-PbS, полученного гидрохимическим осаждением, может быть объяснена образованием оксидных прослоек [3], затрудняющих эффективный сток дефектов в узкозонную фазу. Таким образом можно утверждать, что с точки зрения радиационной стойкости к электронному облучению метод гидрохимического осаждения является перспективным.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-02-31089-мол_а).

Библиографический список

1. Марков В.Ф., Маскаева Л.Н. Определение периода кристаллической решетки и состава химически осажденных пленок твердых растворов замещения: методические указания к лабораторной работе. // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. 2005. С.20.
2. Rokakh A.G., Stetsyura S.V., Trofimova N.B., Elagina N.V. Stabilizing effect of doping with PbS on properties of CdS_xSe_{1-x} wide-gap photoconductors // Inorganic Materials. 1999, T. 35, № 5. P. 452-454.
3. Маляр И.В., Стецюра С.В.. Влияние морфологии и состава фаз поверхности на радиационную стойкость гетерофазного материала CdS-PbS // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. №. 7. С. 916-922.

ОСВЕЩЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКИ КАК ФАКТОР ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ОБЛАСТЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ АДСОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЛЯ НАНО- И БИООБЪЕКТОВ

И.В.Маляр, С.В.Стецюра

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: imalyar@yandex.ru

Полупроводниковые материалы, в частности, кремний, представляют интерес не только для микроэлектроники, но и для создания различных сенсоров и датчиков, где они могут выступать как в качестве преобразователя регистрируемого воздействия в электрический сигнал [1], так и непосредственно в качестве чувствительного элемента [2].

В настоящее время ведутся исследования по разработке технологии создания полупроводниковых биочипов – матриц сенсоров, чувствительных к различным биологическим объектам. Так как регистрация сигнала происходит в результате процесса адсорбции молекул (частиц) на поверхности сенсора, то поверхность и её обработка играют доминирующую роль в формировании результирующего сигнала.

Для создания биочипов достаточно широко используется кремний, так как современные технологии микроэлектроники позволяют создавать монокристаллические пластины большого диаметра (до 45 см) с заданным удельным сопротивлением и низкой шероховатостью (менее 0,5 нм), а также модифицировать их поверхность с микронной точностью.

Так как объектами анализа биочипов часто являются жидкости, то одним из возможных механизмов адсорбции может быть электростатическое взаимодействие между сенсором и биологическими объектами, так как последние обладают электрическим зарядом в водном растворе. Например, ДНК обладает сильным отрицательным зарядом. В результате адсорбции биологических молекул происходит изменение заряда на поверхности полупроводниковой подложки, а, следовательно, потенциала, что легко можно зарегистрировать [1]. Таким образом, управляя зарядом поверхности полупроводниковой подложки, можно управлять адсорбцией биологических объек-

тов, а также синтетических полимерных молекул, обладающих зарядом в водном растворе – полиэлектролитов или заряженных нанобъектов, например, стабилизированных наночастиц.

Большинство полупроводников (и кремний в частности) являются фоточувствительными материалами, то есть освещение приводит к генерации в них электронно-дырочных пар. В работе [3] было показано, что при наличии заряда на поверхности кремниевой пластины с туннельно-прозрачным слоем оксида при освещении происходит туннелирование неравновесных электронов на ловушки в слое диэлектрика, что изменяет интегральный заряд поверхности. Таким образом, наблюдался эффект фотопамяти.

В работах [4, 5] было показано, что освещение влияет на толщину и шероховатость слоя катионных полиэлектролитных молекул, адсорбированных на поверхность кремниевых подложек. Также было показано, что наблюдаемое явление было вызвано изменением конформации адсорбированных молекул из-за роста их электростатического взаимодействия с кремниевой подложкой в результате туннелирования генерируемых светом электронов на ловушки в оксиде. Также было отмечено, что если знак эффекта фотостимулированной адсорбции полиэлектролитных молекул не зависел от типа проводимости кремниевой подложки (толщина адсорбируемого слоя всегда уменьшалась при освещении), то относительная величина изменения при тех же параметрах освещения была выше для *n*-Si.

Кроме того, наблюдался эффект фотостимулированной адсорбции для наночастиц золота диаметром 8 нм, стабилизированных в лимонной кислоте. Так как наночастицы обладали отрицательным зарядом, то они адсорбировались только на кремниевые подложки с предварительно осаждённым слоем катионного полиэлектролита, например, полиэтиленимина. На рис. 1 показаны изображения поверхности приготовленных образцов, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). В качестве источника освещения была использована галогеновая лампа. Из представленных данных видно, что освещение усиливает адсорбцию золотых наночастиц, однако, механизм явления пока не выяснен.

Ранее в работах [6] было показано, что адсорбция тимусной ДНК происходит только на кремниевые подложки с дырочным типом проводимости при добавлении $MgCl_2$ и только при освещении. Объяснение основывается на генерации электронно-дырочных пар в кремнии, которые разделяются поверхностным зарядом полупроводника таким образом, что электроны направляются к поверхности, увеличивая отрицательный заряд поверхности, и усиливают адсорбцию ионов магния из раствора, которые играют роль мостиков для соединения ДНК с поверхностью кремния. Наши эксперименты показали, что адсорбция ДНК при освещении наблюдается и в отсутствие ионов магния в растворе.

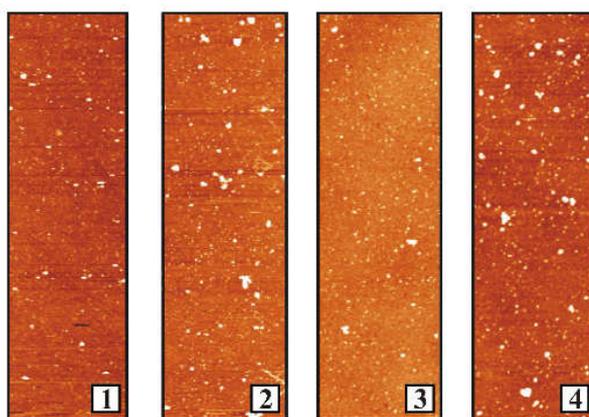


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности подложек p -Si (1 и 2) и n -Si (3 и 4) со слоем полиэтиленimina и золотыми наночастицами диаметром 8 нм, которые осаждались при освещении видимым светом (2 и 4) и без (1 и 3)

Таким образом, представленные данные наглядно демонстрируют, что освещением можно управлять адсорбцией различных объектов на поверхности полупроводников. При этом пока не все механизмы данного явления до конца описаны и поняты.

Также были проведены эксперименты по пространственному разделению областей на поверхности и заданию их различных свойств с помощью освещения, а точнее с помощью интерференционной литографии. На рис. 2 представлены АСМ-изображения поверхности кремниевых подложек, с осажденными молекулами тимусной ДНК и слоем полиэтиленimina. Наблюдаемое размытие интерференционных картин может быть вызвано диффузией неравновесных носителей заряда вдоль поверхности.

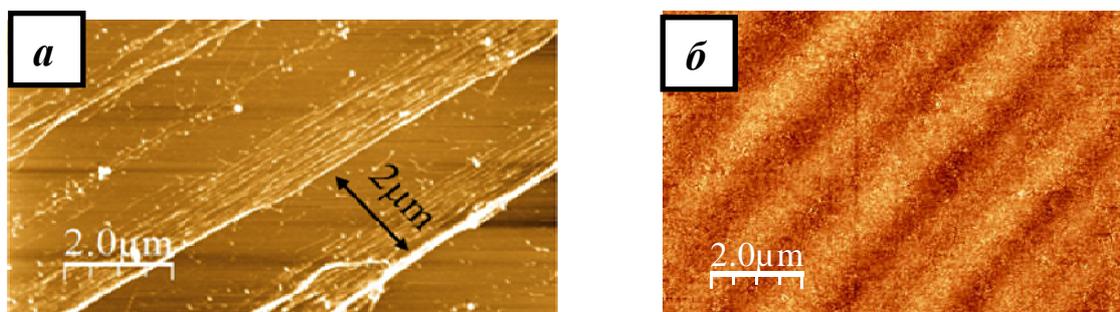


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности кремния после осаждения при освещении интерференционной картиной лазером с $\lambda=650$ нм тимусной ДНК (а) и лазером с $\lambda=442$ нм полиэтиленimina (б)

Таким образом, освещение позволяет управлять процессом адсорбции, а также может быть использовано для создания периодических структур с различными адсорбционными свойствами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-31089 мол_а).

Библиографический список

1. *Poghossian A., Cherstvy A., Ingebrandt S., Offenhäusser A., Schöning M. J.* Possibilities and limitations of label-free detection of DNA hybridization with field-effect-based devices // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2005. V. 111. P. 470-480.
2. *Chen Z., Lu C.* Humidity sensors: a review of materials and mechanisms // *Sensor letters*. 2005. T. 3 (4). С. 274-295.
3. *Mizsei J.* Ultra-thin insulator covered silicon: potential barriers and tunnel currents // *Solid-State Electronics*. 2002. V. 46. P. 235–241.
4. *Malyar I.V., Gorin D.A., Santer S., Stetsyura S.V.* Photocontrolled adsorption of polyelectrolyte molecules on a silicon substrate // *Langmuir*. 2013. V. 29. №52. P. 16058–16065.
5. *Маляр И.В., Santer S., Стецюра С.В.* Влияние освещения на параметры полимерного покрытия, осаждаемого из раствора на полупроводниковую подложку // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. №14. С. 69-76.
6. *Волков И.Л., Базлов Н.В., Бондаренко А.С., Вывенко О.Ф., Касьяненко Н.А.* Светоиндуцированная нековалентная фиксация днк и синтетических полиионов на поверхности монокристаллов кремния // *Журнал структурной химии*. 2009. Т. 50 №5. С. 994-1001.

О МЕХАНИЗМАХ ПРОВОДИМОСТИ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ДВУОКИСИ ТИТАНА

А.В. Хохлов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: ihohlovav@info.sgu.ru

Одним из важнейших достижений современной полупроводниковой микро- и наноэлектроники за последние 10 лет является разработка энергонезависимой полупроводниковой памяти. Исследование физических процессов в МОП-транзисторах различной структуры позволило создать принципиально новые приборы – МОП-транзисторы с дополнительным «плавающим» затвором в виде области поликристаллического кремния, легированного фосфором. Такой «плавающий» затвор, расположенный в подзатворной области SiO_2 , захватывает свободные электроны, туннелирующие под воздействием электрического поля затвора через тонкий слой SiO_2 , и способен сохранять постоянный заряд в течение десятков лет [1]. Компактность ячеек памяти с «плавающим» затвором (флэш-ячеек), содержащих единственный транзистор, простота записи, чтения и перезаписи информации произвели настоящую революцию в вычислительной технике. В настоящее время популярные «флэш-ки» с USB-портом могут иметь объем памяти до 128 Гбайт, а твердотельные накопители или SSD (от англ. Solid State Disk) выпускаются с объемом 512 Гбайт.

Прошло всего несколько лет, и специалисты обсуждают реальность замены флэш-памяти новыми накопителями на базе элементов, получивших название «мемристоров». При этом утверждается, что плотность хранения данных возрастает в 2 раза, скорость записи и чтения – в 10 раз, а расход энергии уменьшается на порядок.

Термин «мемристор» появился в литературе в 1971г., когда профессор Калифорнийского университета в Беркли Леон Чуа обосновал существование четвертого элемента электросхем (наряду с сопротивлением, индуктивностью и емкостью), реализующего прямую связь между магнитным потоком Φ и зарядом Q [2]. Отношение $M = \Phi/Q$ имеет размерность сопротивления и зависит от ранее пропущенного через него заряда, т.е. обладает памятью. Отсюда и название элемента (англ. Memory – память и резистор). Практический образец мемристора был создан через 37 лет в компании Hewlett-Packard [3] в виде твердотельного устройства на основе двуокиси титана. Для этого аморфный TiO_2 претерпевает термическую обработку и приобретает кристаллическую структуру с запрещенной зоной шириной 3 eV. Слой кристаллического диоксида титана толщиной $D = 30 - 50$ нм с одной стороны на некоторую глубину w допируется кислородными вакансиями (рис. 1, а), т.е. возникает некое подобие дырок с зарядом $+2$. Остальная часть пленки оказывается нейтральной. На эту двухслойную пленку с двух сторон осаждаются платиновые проводники и подводится напряжение смещения U (плюс на легированном слое). При увеличении U граница слоев смещается, и суммарное сопротивление слоя уменьшается. Ячейки имеют нанометровые размеры, а проводники располагаются под углом 90° , чтобы облегчить их соединения в массивах.

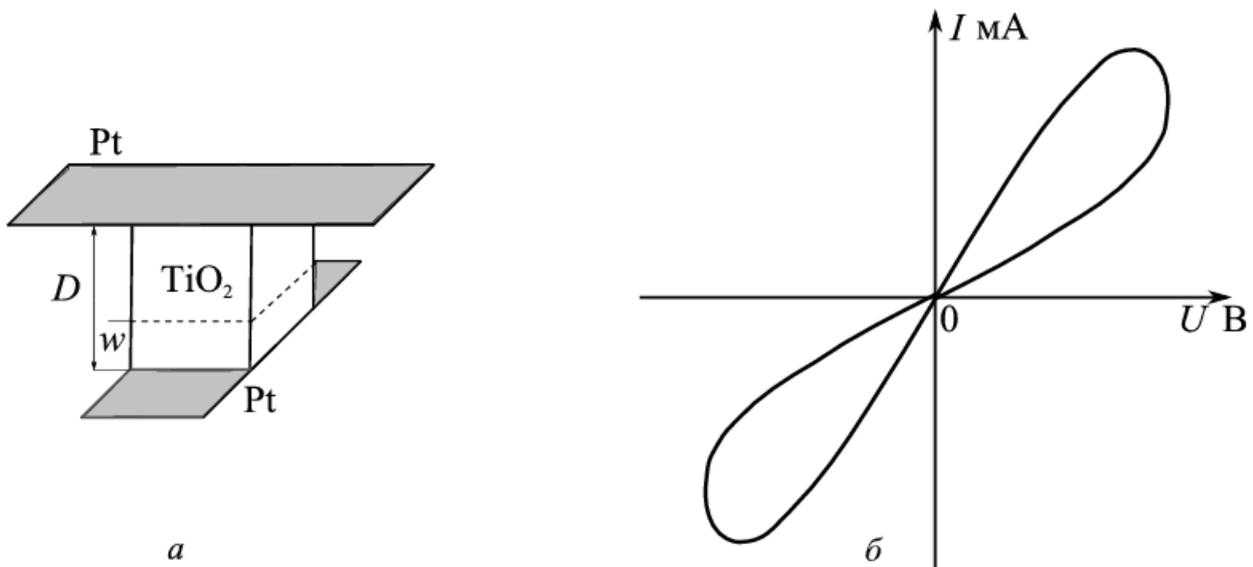


Рис. 1. Структура мемристора на основе двуокиси титана (а) и ВАХ, рассчитанная при численном решении системы уравнений (2)

Из общих соображений в [3] была представлена математическая модель мемристора в виде

$$v(t) = \left(R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t), \quad \frac{dw(t)}{dt} = \frac{\mu R_{on}}{D} i(t), \quad (1)$$

где R_{on} и R_{off} - сопротивления допированной и недопированной областей, μ - подвижность кислородных вакансий. Отсюда

$$w(t) = R_{on} \frac{\mu}{D} q(t),$$

$$v(t) = \left(R_{on}^2 \frac{\mu}{D^2} q(t) + R_{off} \left(1 - R_{on} \frac{\mu}{D^2} q(t) \right) \right) i(t) \approx R_{off} \left(1 - R_{on} \frac{\mu}{D^2} q(t) \right) i(t). \quad (2)$$

Решение системы уравнений (2) позволило получить ВАХ (рис. 1, б), содержащую петлю гистерезиса, проходящую через начало координат и удовлетворительно объясняющую эффект сохранения накопленного заряда. При этом процессы, протекающие на границах металл – допированный (недопированный) кристалл, их влияние на концентрацию и подвижность носителей, а также на величину проводимости структур, не рассматривались.

В настоящем докладе рассматривается возможное влияние барьеров Шоттки на проводимость мемристорных структур и строятся зонные структуры соответствующих переходов. Показано, что барьеры Шоттки наиболее существенны на границе кристалла с положительно заряженным электродом, а переход с отрицательно заряженным электродом является невыпрямляющим. В докладе с позиций физики твердого тела анализируются процессы записи, чтения и стирания информации, исследуются временные и частотные характеристики.

Библиографический список

1. Хохлов А.В., Вадивасова Т.Е., Шабунин А.В. Полупроводниковая энергонезависимая флэш-память // Элементная база радиоэлектроники. Тенденции и перспективы развития. Изд-во СГУ. 2014. С. 184 – 191.
2. Chua L. O. Memristor – the missing circuit element // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. V. 18. P.507 – 519.
3. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S.M. The missing memristor found // Nature. 2008. V. 453. № 7191. P.80 – 83.

ПОЛУЧЕНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГРАФЕНОПОДОБНЫХ СВЕРХСТРУКТУР

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Р.К. Яфаров

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Научно-технические проблемы при создании и характеристике наноструктур для применения в наноэлектронике связаны со структурированием низкоразмерных материалов на масштабе нескольких параметров кристаллических решеток. Получение такого рода наноструктур требует разработки новых методик с использованием электронной литографии, фокусированных ионных пучков, сухого травления. Другой подход в создании подобных структур связан с поиском и разработкой технологических процессов, протекание которых обусловлено природными особенностями самих материа-

лов, выражающиеся в создании заданных архитектурных форм с использованием явлений молекулярной самосборки и/или самоорганизации [1]. Для увеличения выхода годных структур и приборов очень важно контролировать наличие скрытых (подповерхностных) дефектов в используемых при создании устройств материалах и локализацию дефектов с возможно более высокой точностью и в короткое время. Такие возможности открываются, в частности, при использовании ближнеполевой СВЧ микроскопии [2,3]. Область применения ближнеполевой диагностики охватывает широкий круг практических задач современной электроники, материаловедения, дефектоскопии, медицины.

Целью работы являлось разработка новых технологий получения и диагностики углеродных пленочных покрытий для микро- и наноэлектроники, проведение корреляционных тестовых исследования композитных наноалмазографитовых структур с использованием атомно-силовой, электронной и ближнеполевой СВЧ микроскопии.

Осаждение углеродных покрытий проводилось в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника на частоте 2,45 GHz [4]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля имели значения, соответственно, 250 W и 875 Gs. Осаждение осуществлялось на стеклянные подложки с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола при давлении 0,05 Pa. Это обеспечивало выполнение условий электронного циклотронного резонанса, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5%. Подложки в экспериментах нагревались до температуры $300 \pm 10^\circ\text{C}$.

С использованием рентгеноструктурных исследований было показано [4,5], что в указанных режимах СВЧ ионно-плазменного осаждения углеродных структур из паров этанола реализуется алмазоподобная фаза углерода с гексагональной решеткой трех различных структурных модификаций (лонсдейлит, C(20H) и др.). Кроме того, она включает фазу алмаза кубической структуры с ориентацией (111) и имеют небольшие включения мелкокристаллической фазы графита (002).

Исследование полученных углеродных покрытий с использованием разработанной аппаратуры ближнеполевой СВЧ микроскопии показало наличие, нерегистрируемых визуально или электронной микроскопией, фракталоподобных сверхструктур, напоминающих по внешнему виду структуру гигантского (по аналогии с гигантскими фуллеренами) графена [6] (рис. 1).

Исследования полученных образцов методами электронной микроскопии и катодолюминисценции (рис. 2) на сканирующем электронном микроскопе «МИРА-II» показали, что атомы углерода в полученном покрытии находятся как в состоянии sp^3 гибридизации, как в алмазе или метане, так и в состоянии sp^2 гибридизации, как в графите и графене. Об этом свидетельствует наблюдаемая сильная катодолюминисценция, по сравнению с образцами, полученными в других режимах осаждения графитоподобных углеродных пленок.

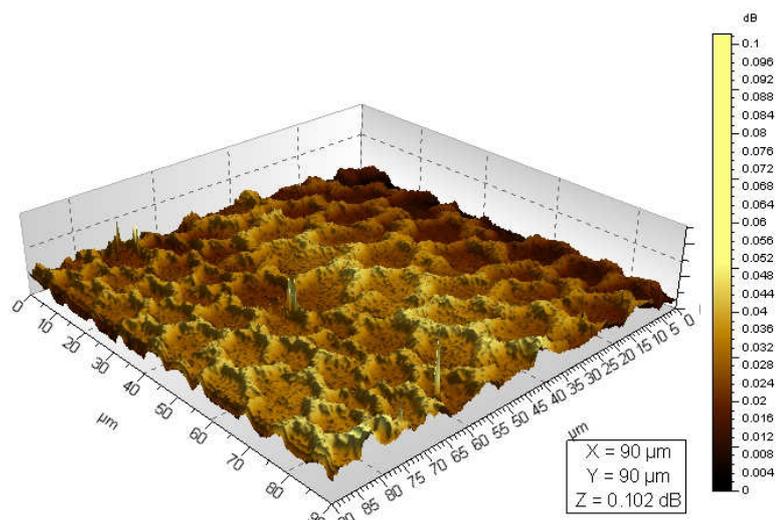


Рис. 1 - Визуализация углеродных самоструктурированных покрытий с использованием сканирующей зондовой ближнеполевой СВЧ-микроскопии

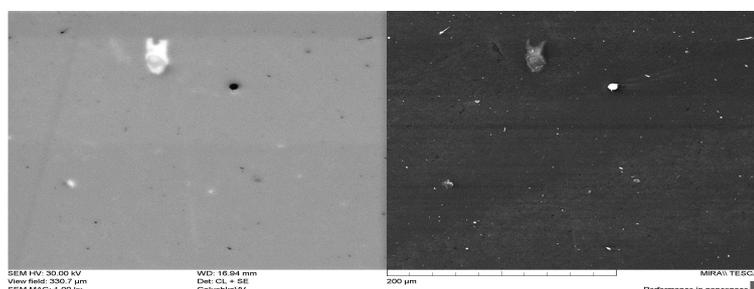


Рис. 2. СЭМ - изображение участка углеродного покрытия в режиме катодолуминесценции (слева) и вторичных электронов

Из рис. 3, на котором приведено АСМ изображение данного графеноподобного пленочного покрытия, полученное с использованием сканирующего зондового атомно-силового микроскопа AFM5600 Agilent Technologies, видно, что оно не является однослойным или даже многослойным, а макроскопическим образованием с размерами гексагональных ячеек, превышающих постоянную кристаллической решетки графена ($a = 1,42 \text{ \AA}$, $d \approx 2,46 \text{ \AA}$) в несколько десятков тысяч раз. Так, размер гексагональной ячейки на стеклянной подложке составляет около 7,5 мкм, стенка, разделяющая ячейки, имеет в сечении вид треугольника с суб-10 нм радиусом закругления высотой около 0,3 мкм и толщиной основания 2,5-3,5 мкм. Отличительной особенностью подобных структур является отсутствие замкнутых гексагональных ячеек. Разрывы стенок в ячейках, образованных ветвящимися островками, могут составлять от нескольких нанометров до единиц микрометров. Формирование подобной ячеистой структуры осуществляется из различных ветвящихся островков, по всей вероятности, чередованием наноструктурных фаз с sp^2 и sp^3 связями, которые вместе с другими подобными им ветвящимися островками образуют квазизамкнутую гексагональную сверхструктуру.

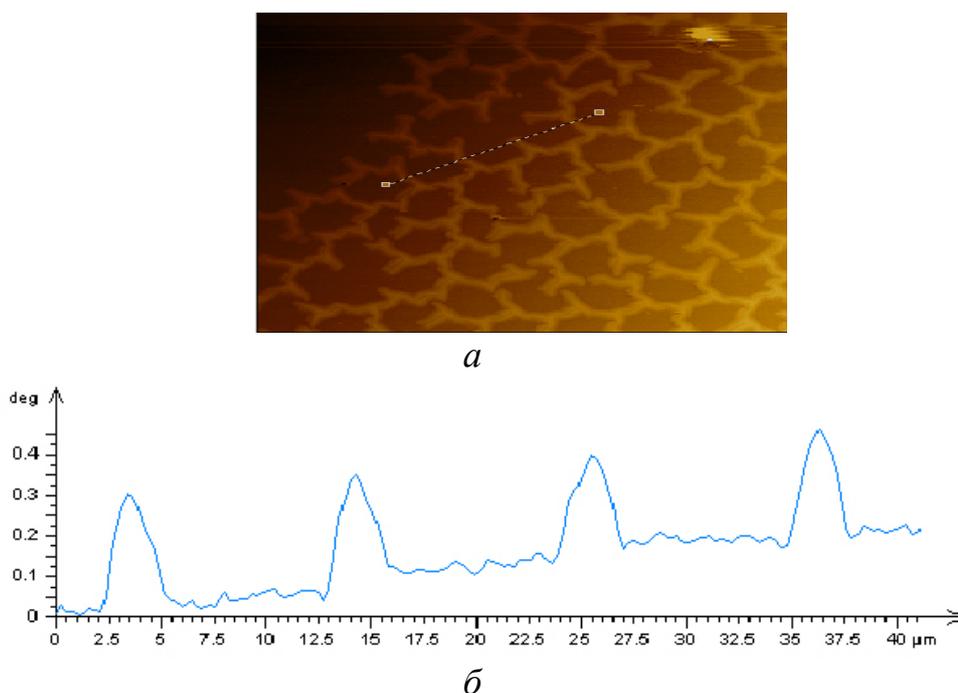


Рис. 3. АСМ-изображение графеноподобной углеродной пленки (а) и ее морфологические характеристики в зоне сканирования (б)

Таким образом, можно предположить, что полученная сверхструктура больше соответствует графановой или графоновой модификации углерода. Графан – химически модифицированный графен. Химическая модификация вносит изменения в электронную структуру графена, создавая ненулевую запрещенную зону. Графановый лист можно также представить как вырезку из структуры алмаза. Графан фактически имеет такую же формулу, как и бензол, в них одинаковое соотношение углерода и водорода – 1:1; и графан, и бензол – это C_nH_n . Графан, как и графон - полугидрированный графен, использованием потока водорода и отжига при $T = 425^\circ C$ может обратимо превращаться в графен [6].

Как известно, синтез графена остаётся на сегодняшний день не полностью решённой задачей. Несмотря на многочисленные предложенные методы, пока не найдена универсальная методика, которая позволяла бы получать высококачественные образцы графена в производственных масштабах. Все опубликованные методы получения образцов имеют недостатки, а образцы графена могут быть использованы лишь для конкретной цели, в зависимости от способа синтеза. Поэтому разработка новых методик синтеза графена и усовершенствование уже имеющихся являются крайне интересными и актуальными темами в исследовании графена.

Как показали полученные результаты, реализован новый низкотемпературный ($200 - 300^\circ C$) метод плазмохимического осаждения графеноподобных покрытий на подложках из стекла и кремния. Используемая температура синтеза в 2–3 раза ниже, чем в методе CVD, и совместима с процессами полупроводниковой электроники. Другим достоинством метода является возможность получения покрытий непосредственно на диэлектрических под-

ложках. Это позволяет получать покрытия на таких подложках как стекло, пластики и т.д.

Сфера применения графеноподобного покрытия - создание качественных и дешевых плоскостельных экранов и солнечных батарей, а также сверхчувствительных газовых детекторов, способных обнаружить малейшую утечку газа. Наиболее перспективными областями применения полученного покрытия на настоящее время является использование для изготовления электродов в ионисторах (суперконденсаторах), в перезаряжаемых источниках тока с энергоемкостью превышающей энергоемкость свинцово-кислотных аккумуляторов (30–40 Вт·ч/кг). В более отдаленной перспективе это использование в органических светодиодах в качестве материала для анода взамен легированного оловом оксида индия и в производстве ЖК-дисплеев с использованием в качестве прозрачных электродов.

Таким образом, впервые получена с использованием неравновесной высокоионизованной СВЧ плазмы низкого давления и диагностирована с помощью сканирующей зондовой ближнеполевой СВЧ и атомно силовой микроскопии новая композитная наноалмазографитовая графеноподобная сверхструктура. Проведенные корреляционные исследования демонстрируют высокую чувствительность методики ближнеполевого СВЧ зондирования к изменению параметров наноморфологии исследуемых композитных сверхструктур, которая сравнима с чувствительностью зондовой атомно-силовой микроскопии.

Синтез диагностированных алмазографитовых графеноподобных сверхструктур в неравновесной СВЧ плазме низкого давления, в отличие от графена, может осуществляться непосредственно на диэлектрических подложках неограниченных размеров при температуре не превышающей 300°C. Предложен, в качестве гипотезы, механизм формирования подобной сверхструктуры, обусловленный одновременным синтезом в неравновесной высокоионизованной СВЧ плазме и чередованием конденсированных на «холодных» подложках цепочечных углеродных наноструктур с sp^2 и sp^3 связями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376).

Библиографический список

1. Нанотехнологии в электронике. Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. 448 с.
2. *Усанов Д.А.* Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области её применения. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 2010. 100 с.
3. *Usanov D.A., Nikitov S.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolubov A.S., Korotin B.N., Feklistov V.B., Ponomarev D.V., Frolov A.P.* Microwave Imaging of the Ceramic Plate Surface with the Nanometer Metal Layer by Means of the Near-Field Microscope Based on the Gunn-Diode Oscillator // Proceedings of the 41th European Microwave Conference. 9–14 October 2011. Manchester, UK. P. 210–213.
4. *Яфаров Р.К.* Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. – М.: Физматлит, 2009. 216 с.
5. *Зайцев Н., Горнев Е., Орлов С., Красников А., Свечкарев К., Яфаров Р.* Наноалмазографитовые автоэммиттеры для интегральных автоэмиссионных элементов. // Наноиндустрия. 2011. №5. С. 7–12.

6. Успехи нанотехнологии: электроника, материалы, структуры. Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. – М.: Техносфера. 2011. С.496.

ОПТИЧЕСКИ АКТИВНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ПЛАЗМОННАЯ МОДА В ЭКРАНИРОВАННОЙ ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ

*В.С. Мельникова^{1,2}, *, Д.В. Фатеев¹, В.В. Попов^{1,2}*

¹Саратовский филиал Института Радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,

²Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

* E-mail: darth.user@yandex.ru

До настоящего времени считалось, что в одиночной (в том числе экранированной) двумерной электронной системе (2МЭС) с одним типом носителей заряда может существовать только одна плазмонная мода, связанная с осцилляциями электронной плотности в плоскости 2МЭС. Частота данной (продольной) плазмонной моды увеличивается с ростом ее волнового вектора, при этом зависимость частоты от волнового вектора меняется от корневой (для неэкранированной 2МЭС) до линейной (для сильно экранированной 2МЭС) [1]. В принципе, поперечные колебания заряда также возможны в квантово-размерных слоях за счет переменного эффекта Штарка (изменение профиля потенциала квантовой ямы в электрическом поле). Данный эффект, в частности, приводит к деполяризованному плазменному сдвигу частот межподзонных переходов в квантовых ямах [2]. При этом, несмотря на то, что сам межзонный переход является квантовым эффектом, частота деполяризованного сдвига определяется классической объемной плазменной частотой электронного газа в квантовой яме вследствие классического характера плазменных колебаний. Поперечная плазмонная мода в 2МЭС, включая монослойный графен, изучалась в классической постановке задачи в работах [3,4].

В данной работе теоретически исследованы дисперсия, затухание и дипольный момент поперечной плазмонной моды в экранированной 2МЭС

В квазиэлектростатическом подходе решена задача о распространении ТМ-поляризованной поверхностной волны вдоль 2МЭС (рис. 1). Двумерная электронная система конечной толщины d экранирована металлической плоскостью, отделенной от 2МЭС барьерным слоем толщиной h . Диэлектрическая проницаемость 2МЭС описывается в модели Друде:

$$\varepsilon_2(\omega) = \varepsilon - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (1)$$

где ε – частотно независимая диэлектрическая проницаемость кристаллической решетки 2МЭС, ω – круговая частота волны, γ – частота релаксации импульса электронов в 2МЭС. Величина

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_s}{\epsilon_0 m d}}, \quad (2)$$

входящая в правую часть выражения (1), представляет собой объемную плазменную частоту электронного газа в 2МЭС, где N_s – поверхностная концентрация электронов в 2МЭС, e и m – соответственно заряд и эффективная масса электрона и ϵ_0 – электрическая постоянная. В теоретической модели металлический экран представлялся идеально проводящей плоскостью.

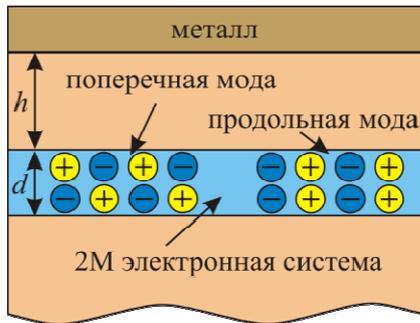


Рис. 1. Экранированная двумерная электронная система. Схематически показан характер колебаний электрических зарядов в продольной и поперечной плазменных модах.

Численные расчеты дисперсии и затухания плазменных мод были выполнены для 2МЭС толщиной $d = 30$ нм на основе полупроводниковой гетероструктуры GaN/AlGaN с концентрацией электронов $N_s = 7.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и при значении частоты релаксации импульса электронов $\gamma = 6.67 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Как видно из рис. 2, а в ТГц диапазоне частота поперечной моды может превышать частоту продольной моды на порядок величины, что означает на порядок большую добротность поперечной моды при одинаковой величине затухания обеих мод $\text{Im}(\omega) = \gamma/2$. В отличие от продольной плазменной моды поперечная плазменная мода демонстрирует отрицательную дисперсию (обратная волна). Известно, что частота продольной плазменной моды стремится к нулю при приближении металлического экрана к 2МЭС [5]. Если при этом частота плазмона становится меньше частоты релаксации импульса электронов в 2МЭС, то возбуждение добротной продольной плазменной моды становится невозможным на низких частотах (рис. 2, а). Напротив, частота поперечной плазменной моды остается конечной при приближении металлического экрана к 2МЭС.

Продольная и поперечная плазменные моды характеризуются различным распределением колеблющихся зарядов, колеблющихся на противоположных поверхностях 2МЭС и на поверхности проводящего экрана, которые создают дипольный момент плазменной моды. В вертикально симметричной неэкранированной 2МЭС поперечная плазменная мода имеет нулевой суммарный электрический дипольный момент, и поэтому ее возбуждение затруднено из-за слабой связи с электромагнитным излучением. При достаточно большой толщине барьерного слоя (порядка длины плазменной волны в 2МЭС) дипольный момент продольной моды максимален, а дипольный момент поперечной моды практически равен нулю вследствие слабой вертикальной асимметрии структуры (рис. 2, б). Дипольный момент продольной моды уменьшается при приближении проводящего экрана к 2МЭС вследствие того, что электрические заряды колеблются в противофазе в 2МЭС и на проводящей плоскости. Напротив, дипольный момент поперечной моды увеличивается при уменьшении толщины барьерного слоя из-за увеличения вер-

тикальной асимметрии структуры. Данное свойство поперечной плазмонной моды в экранированной 2МЭС, наряду с её малым замедлением, приводит к усилению связи данной моды с ТГц излучением, что делает её оптически активной и перспективной для использования в плазмонных устройствах ТГц диапазона.

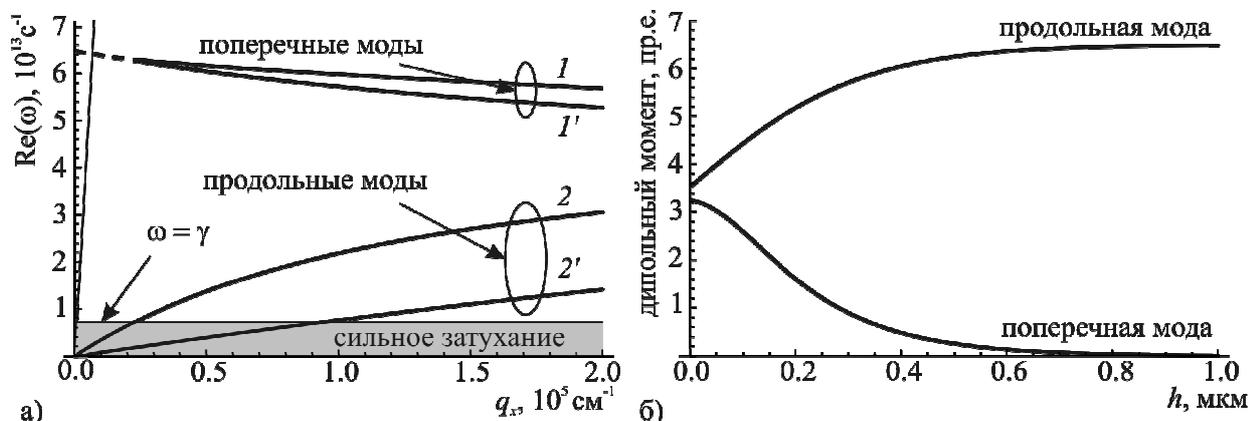


Рис. 2. (а) Дисперсия плазмонных мод в экранированной 2МЭС для разных значений толщины барьерного слоя. Кривые 1 и 2 соответствуют $h = 100$ нм, а кривые 1' и 2' – $h = 5$ нм. Тонкая горизонтальная линия соответствует частоте релаксации импульса электронов при комнатной температуре. Штриховой линией показаны участки дисперсионных кривых поперечной плазмонной моды, соответствующие нефизическому квазиэлектростатическому решению в области малых волновых векторов (порядка и меньше волнового вектора ТГц волны). (б) Суммарный электрический дипольный момент продольной и поперечной плазмонных модах в зависимости от толщины барьерного слоя при $\lambda_p = 1 \mu\text{m}$.

Таким образом, поперечная плазмонная мода существует даже в 2МЭС, расположенной непосредственно на идеально проводящей плоскости. Вследствие малого замедления (по сравнению с фазовой скоростью света) и малого затухания, поперечная плазмонная мода может эффективно связываться с электромагнитным ТГц излучением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-00813).

Библиографический список

1. Popov V.V. Plasmon Excitation and Plasmonic Detection of Terahertz Radiation in the Grating-Gate Field-Effect-Transistor Structures // J. Infrared Milli. Terahz. Waves. 2004. V.32. P. 1178.
2. Ando T., Fowler A. B., Stern F. Electronic properties of two-dimensional systems // Rev. Mod. Phys. 1982. V. 54. P. 437.
3. Sreekanth K. V., Ting Yu Long range surface plasmons in a symmetric graphene system with anisotropic dielectrics // J. Opt..2013. V. 15. P. 055002.
4. Lin Wang, Xiao-Shuang Chen, Wei-Da Hu, Jun Wang, Jian Wang, Xiao-Dong Wang, Wei Lu The plasmonic resonant absorption in GaN double-channel high electron mobility transistors // Appl. Phys. Lett.. 2011. V. 99. P. 063502.
5. Чаплик А. В. Возможная кристаллизация носителей заряда в инверсионных слоях низкой плотности // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. С. 746.

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ РАСТВОРА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА МОРФОЛОГИЮ МОНОСЛОЕВ И ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ

И.А.Горбачев¹, А.В.Ермаков¹, А.С.Чумаков¹, В.П.Ким², Е.Г.Глуховской¹

¹ Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: iliyagorbachev@mail.ru

В последнее десятилетие значительно выросло количество и разнообразие получаемых различных наноразмерных объектов. В связи с чем, одной из важнейших задач стало создание упорядоченных матриц, содержащих наноразмерные объекты, например, квантовые точки (КТ) – интерес к которым объясняется их уникальными свойствами, что открывает широкие перспективы для использования КТ в качестве различных элементов электронной техники (светоизлучающих, фоточувствительных, фотовольтаических, являющихся ловушками для единичных электронов и др). При работе с наноразмерными объектами, в частности, с квантовыми точками (КТ), вопрос чистоты растворов и точность определения концентрации КТ в них является очень актуальным. Часто растворы КТ подвергают дополнительной модификации и очистке. Описанные в ряде работ [1], [2], [3], методы очистки растворов КТ имеют ряд преимуществ и недостатков. Основными недостатками являются сложность, большая продолжительность процессов, последовательное повторение многих стадий с использованием большого количества различных растворителей и т.д. В любом случае после таких процессов (а иногда и после каждой стадии) производится контрольная характеристика растворов. В настоящей работе приведены результаты исследования монослоев сформированных из растворов гидрофобных КТ состава «ядро–оболочка1–оболочка2» – CdSe/CdS/ZnS, до и после проведения низкотемпературной обработки таких растворов КТ.

В работе были использованы квантовые точки, получение которых описано в [4], и затем очищенные путем направленной рекристаллизации при охлаждении до температуры жидкого азота (далее термообработка).

Изучение влияния низкотемпературной обработки на процесс формирования монослоя проводился по методу исследования изотерм сжатия монослоев, для чего были использованы два раствора КТ – исходный раствор гидрофобных квантовых точек в толуоле с ориентировочной концентрацией порядка 6×10^{-6} моль/л, рассчитанной по выходу химической реакции, а также раствор, прошедший термообработку (сильное охлаждение до состояния направленного поэтапного вымораживания компонент раствора). На поверхность деионизованной воды с удельным сопротивлением 15 МОм×см было закапано 15 мкл каждого из растворов, после чего, по прошествии 15 минут, начинался процесс изотермического двустороннего сжатия полученной пленки со скоростью 6 см²/мин. В результате были получены изотермы сжатия, представленные на рисунке 1.

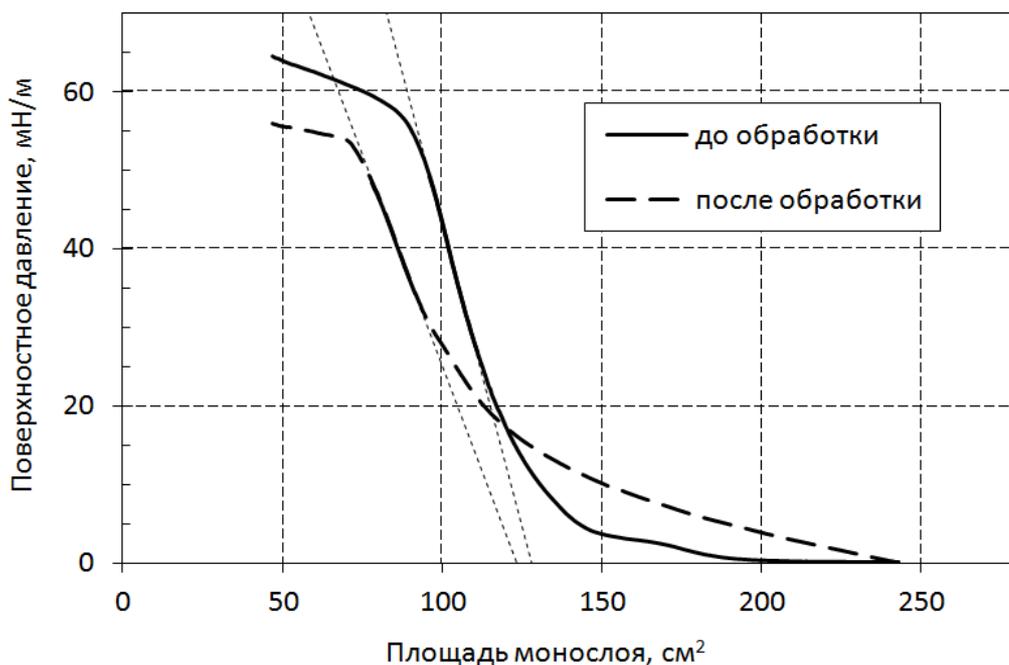


Рис.1 Изотерма сжатия монослоя раствора квантовых точек до очистки

Анализируя изотермы сжатия, можно видеть, что фаза с плотной упаковкой частиц в монослое, сформированном из раствора КТ после обработки, начинает формироваться при меньших значениях площади. При этом фазовый переход из жидкорасширенного в жидкоконденсированное состояние происходит при больших значениях поверхностного давления. Одновременно с этим модуль сжатия монослоя до и после обработки для плотноупакованного состояния составляет $\chi = 202,83$ и $130,548$ мН/м, соответственно, что говорит об уменьшении механической прочности. Максимальное значение поверхностного давления, достигаемое при сжатии МС квантовых точек после обработки, меньше чем у МС без обработки.

Все это говорит об уменьшении поверхностно-активных свойств монослоя, состоящего из амфифильных молекул органической матрицы и квантовых точек. Это в свою очередь напрямую связано с уменьшением органической компоненты, связывающей наночастицы.

Этот же факт наблюдается и в работе авторов [5], которые исследовали МС квантовых точек PbS, PbSe, гидрофобизированных также олеиновой кислотой. Авторы не применяли термообработку, а меняли количество олеиновой кислоты в составе рабочего раствора, который использовался для формирования монослоев, путем смешивания в различных пропорциях растворов квантовых точек и олеиновой кислоты.

Полученные нами и представленные в работе [5] изотермы сжатия имеют схожий вид. Изменения механических свойств МС очень хорошо коррелируют с относительным количеством олеиновой кислоты в составе МС и гидрофобной оболочки КТ. Таким образом, анализ изотерм сжатия подтверждает возможность удаления части молекул олеиновой кислоты из рабочего раствора в процессе термообработки.

Далее монослои, содержащие квантовые точки состава CdSe/CdS/ZnS, переносились на стеклянные подложки при поверхностном давлении 46 мН/м. После сушки в течение суток полученные пленки исследовались методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме.

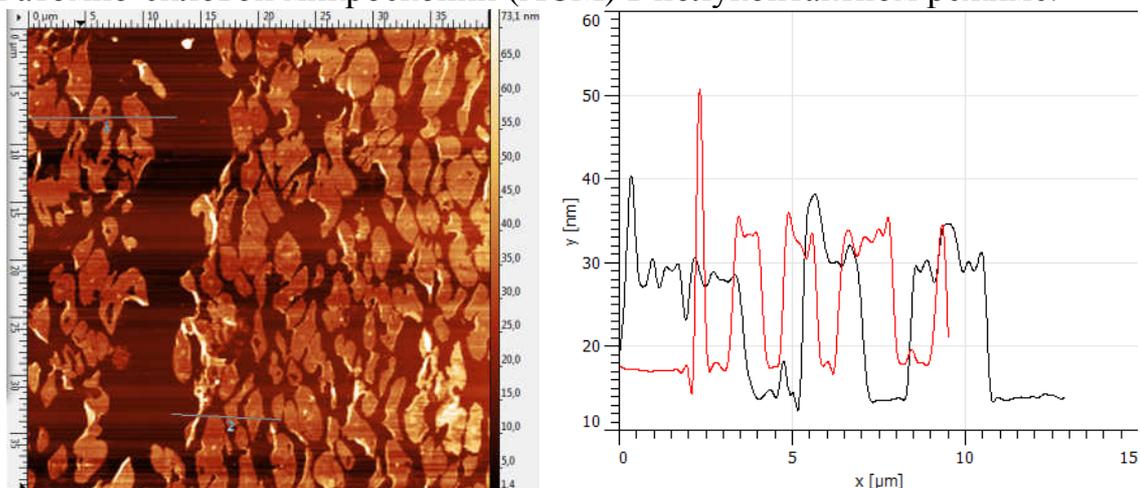


Рис.2. АСМ изображения и профиль высоты перенесенного на твердую подложку монослоя квантовых точек до очистки раствора

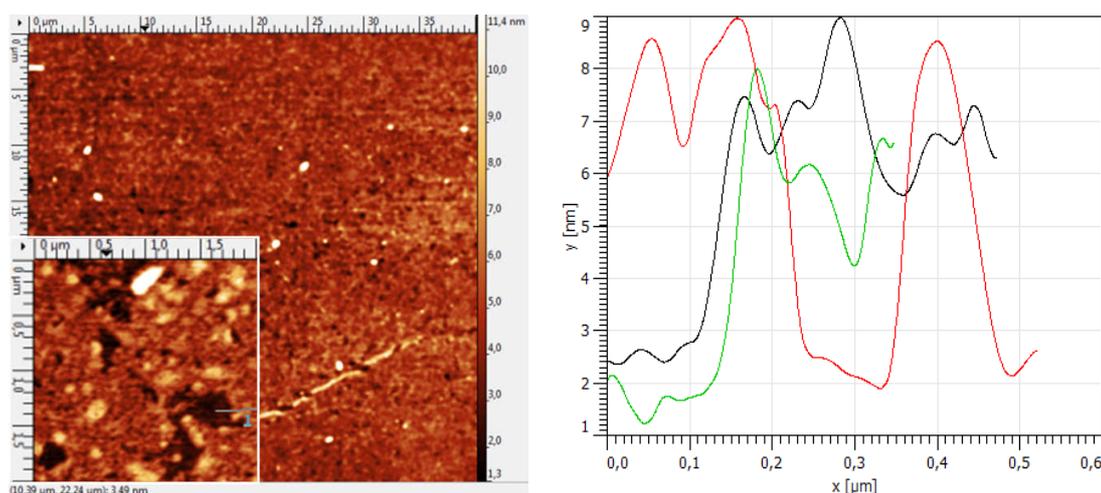


Рис.3. АСМ изображение и профиль высоты перенесенного на твердую подложку монослоя квантовых точек после очистки раствора

На рис. 2 и 3 показаны микроизображения, полученные методом атомно-силовой микроскопии при исследовании пленок монослоев растворов квантовых точек до и после термообработки, соответственно. На рисунках видно, что пленка, полученная из раствора до обработки, представляет собой отдельные островки высотой порядка 12-13 нм. Для пленки, полученной из раствора КТ, прошедшей термообработку, характерна однородная структура с незначительными нарушениями целостности пленки, которые становятся заметными только при увеличении разрешения изображения. Высота пленки составляет порядка 7-8 нм. Подобные значения высот пленок позволяют говорить о формировании монослоя квантовых точек, практически на всей поверхности подложки. В составе пленки также присутствуют отдельные агрегаты квантовых точек, с размерами в плане до 300 нм и высотой до 15 нм.

Предполагается, что они могли образоваться в растворе при понижении температуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-07-00255.

Библиографический список

1. *Qu L., Peng Z.A., Peng X.* Alternative Routes toward High Quality CdSe Nanocrystals // *Nano Letters*, 2001, V.1 №6, P. 333–337.
2. *Wang J, Huang X, Ruan L, Lan T, Ren J.*, Size exclusion chromatography as a universal method for the purification of quantum dots bioconjugates // *PMID*. 2013. V.34. №12. P. 1764-1771. (doi: 10.1002/elps.201200649)
3. *Bartłomiej Kowalczyk, István Lagzi, Bartosz A. Grzybowski*, Nanoseparations: Strategies for size and/or shape-selective purification of nanoparticles // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2011. V. 16. P. 135–148 . (doi:10.1016/j.cocis.2011.01.004)
4. *Сперанская Е.С., Гофман В.В., Дмитриенко А.О., Дмитриенко В.П., Акмаева Т.А., Горячева И.Ю.* Синтез гидрофобных и гидрофильных квантовых точек ядро – оболочка // *Известия Саратовского университета. Серия Химия. Биология. Экология*. 2012. Т.12., вып. 4. С. 3-10.
5. *Yolanda Justo, Iwan Moreels, Karel Lambert, et.al*, Langmuir–Blodgett monolayers of colloidal lead chalcogenide quantum dots: morphology and photoluminescence // *Nanotechnology*. 2010. V.21. P. 295606 doi:10.1088/0957-4484/21/29/295606

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОРГАНИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ

*А.В.Ермаков¹, А.С.Чумаков¹, И.А.Горбачев¹, В.П.Ким²,
Г.Б.Хомутов², Е.Г.Глуховской¹*

¹ Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

E-mail: oualeksej@yandex.ru

Введение

В настоящее время перспективными представляются исследования электрического поля как фактора формирования и существования органических мембран, в том числе биологических, в связи с развитием методов дистанционного управления параметрами таких микрообъектов, как клетки, липосомы, капсулы и т.д для целей биологии, биофизики и медицины, в том числе для создания микроструктур, применяемых в качестве контейнеров для инкапсулирования и адресной веществ. Методы воздействия на параметры мембран таких структур основаны на действии различных факторов: температура, кислотность среды и т.д. [1]. Однако используемые методы воздействия имеют ограничения, в связи с чем стоит задача исследования новых альтернативных методов управления параметрами мембран различных органических микроструктур.

В данной работе исследуются особенности электрохимических процессов при воздействии электрического поля на двумерные планарные органические структуры как модели биологических мембран и объемные липидные

и полимерные микровезикулы – биологические клетки (обычные и модифицированные) и полимерные микрокапсулы.

Для формирования и исследования фундаментальных электрохимических процессов, происходящих с двумерными мембранами, в данной работе использован метод Ленгмюра-Блоджетт, который позволяет формировать мономолекулярные слои (так называемые ленгмюровскими монослоями, далее МС) на границе раздела газ-жидкость и получать уникальные слоистые структуры, в которых каждый мономолекулярный слой может иметь свой собственный химический состав, кристаллическую структуру и ориентацию молекул. Такие монослои часто используются для моделирования клеточных мембран, так как технически клеточная мембрана состоит из двух монослоев фосфолипидов.

Формирование монослоя и его структура зависят от многих факторов, таких как температура субфазы, ее состав, концентрация ПАВ, внешние электрические и магнитные поля и др. Воздействие поперечного электрического поля как технологического параметра остается одним из малоизученных факторов. Обычно, оно используется лишь при проведении исследований МС, например, исследований особенностей структурных перестроек в МС методом скачка потенциала. Влияние электрического поля на процессы, протекающие в ленгмюровской ванне, описывается только в случае направления вдоль поверхности монослоя [2].

Эффект электропорации и электростимулируемого лизиса объемных органических везикул с липидными мембранами, таких как клетки и липосомы широко описаны и применяются на практике [3]. Перспективным направлением деятельности является дифференциация таких структур по чувствительности к электростимулируемому лизису и электропорации. Для сенсibilизации мембран к различным видам воздействия их оболочку модифицируют, вводя нанобъекты, чувствительные к тому или иному виду воздействия [4, 5]. С нашей точки зрения, являются интересными нанокompозитные гибридные микроструктуры на основе комплексов липидов и полимеров с неорганическими наночастицами в качестве сенсibilизаторов к электрическому полю.

1. Планарные органические структуры

Электрическое поле оказывает наиболее существенное влияние на формирование жидкоконденсированной фазы, если в качестве субфазы используется деионизованная вода. Участок изотермы, соответствующий жидко-кристаллическому состоянию, растягивается при приложении напряжения на электроды. Величина растяжения не столько зависит от направления вектора поля (вверх или вниз), сколько от самого факта наложения поля (есть или нет) (рисунок 1) при этом увеличение удельной площади на молекулу составляет около 25% для обоих случаев.

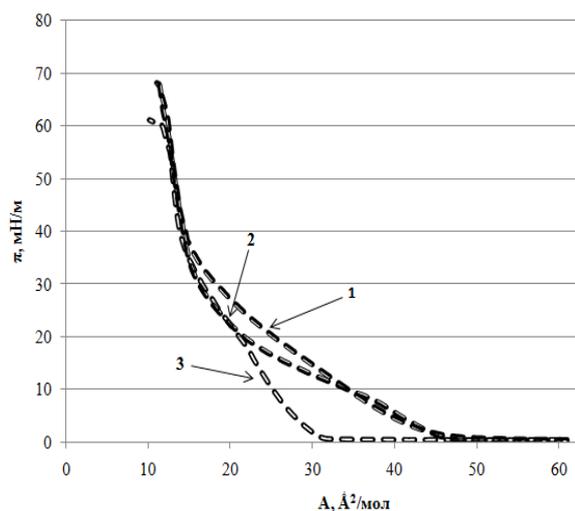


Рис. 1. Изотермы сжатия монослояарахиновой кислоты на поверхности деионизованной воды под воздействием нормально приложенного электрического поля. 1 – вектор напряженности электрического поля направлен вниз; 2 – вектор напряженности электрического поля направлен вверх; 3 – электрическое поле отсутствует.

При формировании МС на поверхности раствора NiCl_2 наблюдаются, по сути, обратные эффекты – ЖК состояние в МС Arh формируется при достаточно сильном разряжении молекул на поверхности – при значении удельной площади $A = 0,55 \text{ nm}^2$, в то время, как при приложении электрического поля значение удельной площади для ЖК состояния становится заметно меньше (рисунок 2).

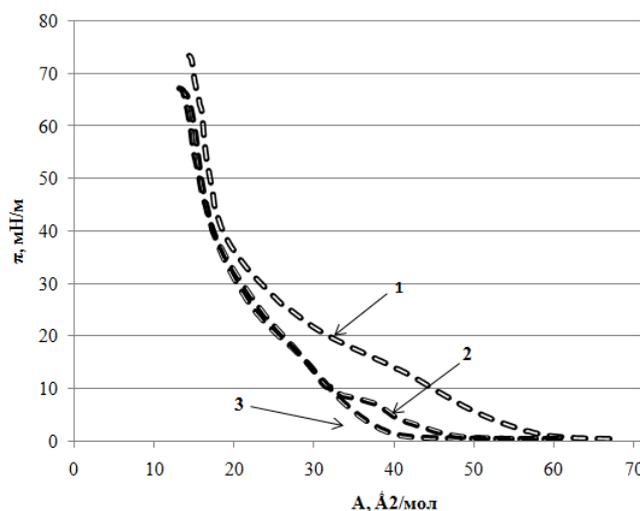


Рис. 2. Изотермы сжатия монослояарахиновой кислоты на поверхности раствора NiCl_2 под воздействием нормально приложенного электрического поля. 1 – электрическое поле отсутствует; 2 – вектор напряженности электрического поля направлен вниз; 3 – вектор напряженности электрического поля направлен вверх.

Мы связываем наблюдаемые эффекты с тем, что часть ионов OH^- вступает во взаимодействие с ионами Ni^{+2} (при приложении положительного потенциала к верхнему электроду) и препятствует протеканию реакции образования соли (арахината никеля), которая разрыхляет монослой без поля. При другой полярности подтягиваются ионы Cl^- , которые не взаимодействуют с

монослоем, т.к. его нижняя часть и так заряжена отрицательно, а ионы Ni^{+2} уходят вниз, также блокируя образование соли [6].

Для подтверждения этого предположения была создана установка, которая позволяет произвести предварительное разделение ионов в воде перед началом эксперимента, и добиться разницы в рН порядка четырёх единиц, что доказывается прямыми измерениями, без добавления каких либо буферов. Такой эффект достигался тем, что сосуд, в который помещалась вода был разделен пополам полупроницаемой мембраной (диализной пленкой), которая устраняет возможность механического перемешивания воды, но при этом не может помешать свободному движению ионов. Таким образом, если создать между различными частями этого сосуда разность потенциалов, то удастся разделить ионы и получить, фактически, чистую с химической точки зрения воду, но при этом её рН будет отличаться от нейтрального значения. Единственным минусом такого метода является лишь то, что необходимо использовать максимально инертные электроды и произвести необходимые измерения в течение небольшого промежутка времени. Изотермы на предварительно подготовленной воде более ярко (рисунок 3) показали обнаруженный ранее эффект, который заключается в увеличении условной площади молекулы ПАВ на участке жидкоконденсированной фазы. Это позволяет судить о том, что именно разделение ионов является ключевым фактором, который изменяет структуру монослоя при воздействии на него электрического поля.

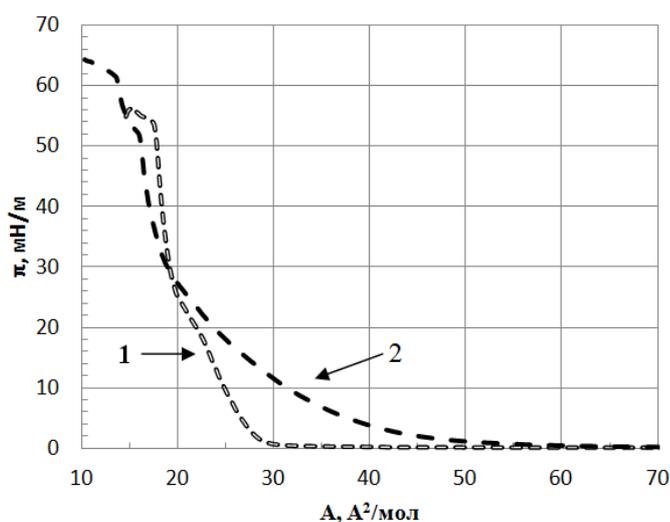


Рис. 3. Изотермы на поверхности деионизованной (1) и предварительно подготовленной воды со смещенным рН (2).

2. Органические везикулы

Исследуемые структуры представляют собой коллоидные гибридные микровезикулы на основе клеток, мембрана которых модифицирована наночастицами золота.

Проведено физическое моделирование процессов взаимодействия мембранообразующих липидов с наночастицами с помощью монослоев на границе раздела. Анализ изотерм сжатия таких монослоев показал наличие связывания наночастиц с мембранами, состоящими из полиамина.

Исследована возможность использования электрического поля для дистанционного управления целостностью липидных и полимерных микроструктур, содержащих в своей оболочке неорганические наночастицы в качестве сенсibilизаторов к электрическому полю.

Возможность сенсibilизации липидной мембраны к электрическому полю была продемонстрирована на примере клеточных структур, фибробластов кожи человека, покрытых слоем наночастиц золота. Наблюдалось значительное (до 10 раз) снижение напряженности поля, необходимой для лизиса модифицированных клеток, по сравнению с обычными клетками (рис. 4).

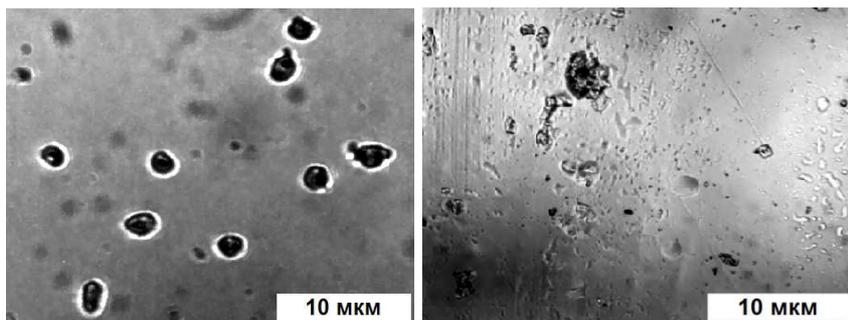


Рис. 4. Воздействие электрического поля на липидные структуры: слева – клетки, покрытые наночастицами золота; справа – разрушенные электрическим полем клетки

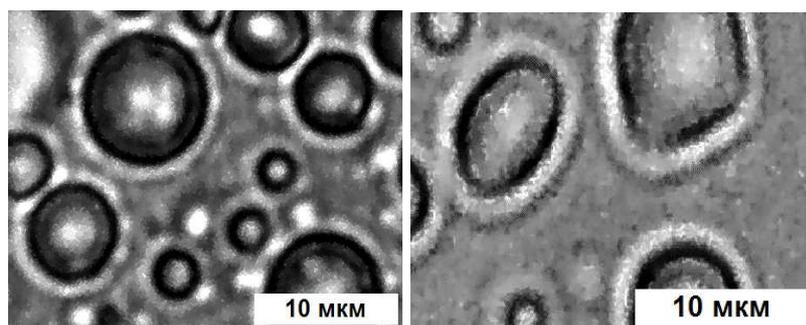


Рис. 5. Воздействие электрического поля на полимерные структуры: слева – полиэлектролитные микрокапсулы; справа – деформированные полиэлектролитные капсулы после слабого воздействия электрическим полем

Принципиальная возможность дистанционного управления проницаемостью микроструктур приложением электрического поля подтверждена так же на примере полимерных микрокапсул, оболочка которых состоит из полиэлектролитных слоев. Показано, что наличие нескольких слоёв наночастиц магнетита в структуре обеспечивает эффективное разрушение оболочек при приложении электрического поля (рис. 5).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-07-00255.

Библиографический список

1. Sukhorukov G. B., Antipov A. A., Voigt A. et al. // Macromol. Rapid Commun. 2001. V. 22. P. 44.
2. Khomutov G. B. Formation of nanoparticles and one-dimensional nanostructures in floating and deposited Langmuir monolayers under applied electric and magnetic fields // Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects 198–200. 2002. P 593–604.
3. Рубин А.Б. Биофизика мембранных процессов / А.Б. Рубин. М. 1999. – Т.2. 464 с.

4. *Kolesnikova T. A., Gorin D. A., Fernandes P. et al.* Nanocomposite Microcontainers with High Ultrasound Sensitivity // *Adv. Func. Mater.* 2010. Vol. 20. P. 1189.
5. *Lu Z., Prouty M. D., Guo Z. et al.* Magnetic switch of permeability for polyelectrolyte microcapsules embedded with Co@Au nanoparticles // *Langmuir.* 2005. Vol. 21. P. 2042.
6. *Чумаков А.С., Горбачев И.А., Ермаков А.В. Ким В.П., Глуховской Е.Г.* Ленгмюровские-монослои в электрическом поле // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика.* 2013. Т.13. С.80-83.

МЕХАНИЗМ ТОКОПЕРЕНОСА В ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ К ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ТРИНИТРИДАМ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ДИСЛОКАЦИЙ

*А.В. Саченко¹, А.Е. Беляев¹, Н.С. Болтовец², П.Н. Брунков³, Ю.В. Жилыев³,
Р.В. Конакова¹, П.О. Сай¹, В.Н. Шеремет¹*

¹Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкрева НАН Украины

²Государственное предприятие НИИ "Орион", Украина,

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,

E-mail: konakova@isp.kiev.ua, bms@i.liev.ua, zhilyaev@ijuv.ioffe.ru

Полупроводниковые соединения A^3N — GaN, AlN, InN и их твердые растворы в настоящее время выращивают и изучают во многих исследовательских центрах [1]. Интерес к этим материалам вызван в связи с рядом их специфических свойств, прежде всего с большой шириной запрещенной зоны (GaN, AlN) и высокими пьезоэлектрическими коэффициентами (InN), делающих первые из них суперматериалами для экстремальной электроники, а InN — перспективным для задач сенсорной электроники. Обладая большим временем релаксации спина электрона и сильным спинорбитальным спариванием, InN представляет интерес также для разработки активных элементов спинэлектроники. Отметим также, что GaN и твердые растворы на его основе нашли применение при изготовлении светодиодов и различных типов НЕМТ [2]. Однако реализация уникальных свойств этих материалов в полупроводниковых приборах существенно затруднена. Дело в том, что в отличие от классических материалов полупроводниковой электроники (Si, соединения A^3B^5) тринитриды из-за отсутствия собственного подложечного материала большой площади в настоящее время выращивают на чужеродных подложках (Al_2O_3 , SiC, Si и др.), что делает эти материалы сильнодефектными. Плотность дислокаций даже в лучших образцах составляет $\sim 10^7$ см⁻², что не может не влиять на параметры соответствующих приборов и в первую очередь омических контактов к ним [3].

Действительно, как было показано в работах [4, 5], величина удельного контактного сопротивления ρ_c омических контактов к полупроводникам с высокой плотностью дислокаций и его температурная зависимость $\rho_c(T)$ существенно зависят от плотности дислокаций, если в процессе формирования омических контактов контактообразующий металл проникает по дислокациям в тонкий приповерхностный слой полупроводника, создавая в нем метал-

лические шунты. При этом с ростом температуры измерений ρ_c , увеличивается. Особенность этого механизма токопрохождения в омическом контакте в отличие от известных состоит в том, что ток протекает через участки обогащенные электронами, а не обедненные, как в контакте Шоттки. В данном сообщении эта модель использована для описания температурной зависимости ρ_c омических контактов к n-GaN, n-AlN и n-InN, полученным с помощью эпитаксии на чужеродных подложках.

Монокристаллические пленки n-GaN и n-AlN были получены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН методом хлоридной газовой эпитаксии, монокристаллические пленки n-InN были выращены там же методом молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией.

Слои GaN толщиной ~ 30 мкм с концентрацией доноров $\sim 10^{18}$ см $^{-3}$ были выращены на AlN template на сапфире. Слои AlN толщиной $\sim 3,5$ мкм с концентрацией доноров менее 10^{17} см $^{-3}$ были выращены на подложке n $^+$ -SiC. Слои InN толщиной $\sim 0,6$ мкм с концентрацией доноров $\sim 10^{18}$ см $^{-3}$ были выращены на подложке Al $_2$ O $_3$, покрытой буферным слоем GaN. Средняя линейная плотность дислокаций в пленках n-GaN(n-AlN) составляла $\sim 10^5$ см $^{-1}$, в пленках n-InN — $\sim 10^4$ см $^{-1}$. Методом последовательного вакуумного напыления на подогретых до 350°C гетероструктурах, содержащих монокристаллические пленки GaN, AlN и InN, выращенных на указанных выше подложках, создавалась контактная металлизация Au(100 нм)-Pd(70 нм)-Ti(50 нм)-Pd(30 нм)-n-GaN(n-AlN) и Au(100 нм)-Ti(50 нм)-Pd(30 нм)-n-InN с последующим формированием тестовых структур для измерения удельного контактного сопротивления методом TLM в диапазоне температур 100-400 К [6]. В растровом электронном микроскопе исследовались сколы контактной металлизации. Оказалось, что для всех исследуемых контактных структур вольтамперные характеристики были линейными и симметричными, что характерно для омических контактов. При этом наибольшее контактное сопротивление при T=300 К наблюдалось для омического контакта к n-AlN, поскольку n-AlN пленка была более высокоомна, чем пленки n-GaN и n-InN.

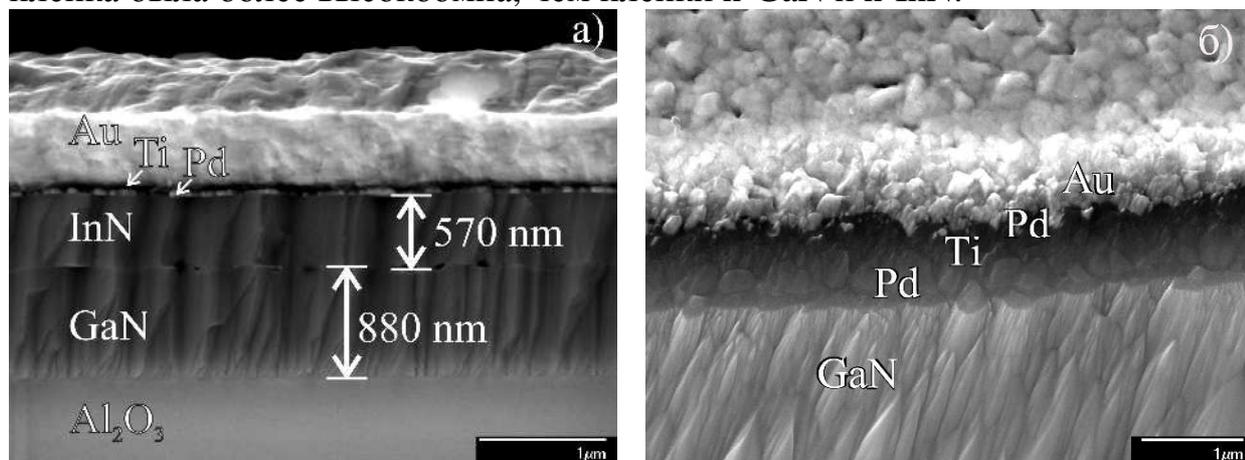


Рис. 1 Сколы омической контактной структуры к n-InN (а) и n-GaN (б)

На сколах контактной металлизации на всех исследуемых образцах отмечались столбчатая структура полупроводника и высокая плотность струк-

турных дефектов в приконтактном слое полупроводника. Типичная морфология сколов омических контактов к n-InN и n-GaN приведена на рис. 1а и 1б соответственно.

Таблица

Измеренные величины ρ_c омических контактов к n-GaN, n-AlN и n-InN при температурах 100, 300 и 400 К

| контакты | ρ_c , Ом·см ² | | |
|-------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| | T=100 К | T=300 К | T=400 К |
| Au-Pd-Ti-Pd-n-GaN | $6 \cdot 10^{-5}$ | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | $1,5 \cdot 10^{-4}$ |
| Au-Pd-Ti-Pd-n-AlN | $5 \cdot 10^{-1}$ | $6,5 \cdot 10^{-2}$ | $7 \cdot 10^{-2}$ |
| Au-Ti-Pd-n-InN | $4 \cdot 10^{-5}$ | $8 \cdot 10^{-5}$ | $1,8 \cdot 10^{-4}$ |

Величины ρ_c исследуемых образцов, измеряемых при температурах 100, 300 и 400 К, приведены в таблице, из которой видно, что ρ_c растет при увеличении температуры, причем для омических контактов к n-GaN и n-InN эффект максимален. Как показали теоретические оценки удельного контактного сопротивления, совпадение с экспериментальными данными наблюдается при величинах плотности дислокаций пересекающих область пространственного заряда $\sim 10^8$ см⁻². Плотность этих дислокаций на 1,5÷2 порядка оказалась меньше общей плотности дислокаций, включающей наряду с проводящими дислокациями дислокации несоответствия (рассеивающие дислокации).

Приведенные в данном сообщении данные об увеличении ρ_c омических контактов к GaN, AlN и InP необходимо учитывать при разработке полупроводниковых приборов на их основе.

Библиографический список

1. Technology of Gallium Nitride Crystal Growth / Ed. by Dirk Ehrentraut, Elke Meissner, Michal Bockowski.— Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. 2010. 326 p.
2. Quay R. Gallium Nitride Electronics / Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. 2008. 471 p.
3. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Механизм протекания тока в омических контактах металл-полупроводник. Обзор. // ФТП. 2007. Т. 41. №11. С. 1281-1308
4. Mechanism of contact resistance formation in ohmic contacts with high dislocation density / A.V. Sachenko, A.E. Belyaev, N.S. Boltovets et al. // Journal of Applied Physics. 2012. V.111, N8. P. 083701.
5. A.V. Sachenko, A.E. Belyaev, N.S. Boltovets et al. Features of temperature dependence of contact resistivity in ohmic contact on lapped n-Si // J. Appl. Phys. 2012. V.112, N6. P. 063703
6. Шеремет В.Н. Метрологические аспекты измерения сопротивления омических контактов // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. 2010. Т.53, №3. С. 3-12.

4. МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПРОЦЕСС СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ГИСТОНОВ

Г.Е. Брилли, А.В. Егорова, Д.Э. Постнов¹

Саратовский государственный медицинский университет
им. В.И. Разумовского Минздрава России,

¹Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: av_egorova@bk.ru

В литературе имеются сведения о влиянии различных видов электромагнитного излучения (ЭМИ) на функционирование генетического аппарата клетки [1]. Однако интимные механизмы этого эффекта исследованы недостаточно. Известно, что проводниками регуляторных влияний на геном могут являться гистоны – основные белки, участвующие в построении нуклеосом – важных структурных единиц, участвующих в функционировании генетического аппарата [3, 4]. Установлено, что способность гистонов формировать нуклеосомы и подвергаться регуляторным влияниям зависят от их самоорганизации и характера тех конечных структур, которые образуются при межмолекулярных взаимодействиях [5].

Нами проведён сравнительный анализ влияния красного лазерного (λ – 660 нм, 1 Дж/см²) и низкоинтенсивного ЭМИ УВЧ-диапазона (1 ГГц) на процесс структурообразования основных типов ядерных гистонов. Для исследования использовались рекомбинантные гистоны человека H1, H2A, H2B, H3.2 и H4, полученные из лаборатории New England Biolabs (США). Гистоны в концентрации 1 мг/мл находились в водно-солевой среде. Использовался метод клиновидной дегидратации, заключающийся в исследовании структурного следа (фации), остающегося после высыхания капли раствора гистона на предметном стекле [2]. Препараты подвергались микроскопическому исследованию. Применялась световая микроскопия (Zeiss, Germany) с фоторегистрацией структурного следа и сохранением информации в файле компьютера. Имидж-анализ фаций включал их качественную характеристику, а также расчёт количественных показателей при помощи специальной компьютерной программы с последующей статистической обработкой.

Установлено, что линейно-поляризованное лазерное излучение красной области спектра оказывало существенное модифицирующее влияние на структурообразовательные свойства коровых гистонов Н2В и Н3.2, в то время как структура фаций гистонов Н1, Н2А и Н4 оставалась практически неизменной. Так, облучение раствора гистона Н2В светом красного лазера значительно модифицировало процесс клиновидной дегидратации. Изменялись как качественные характеристики структурного следа, так и многие количественные показатели. В частности, достоверно увеличивалась площадь центральной зоны фации и степень её структурированности, изменялось взаиморасположение центра центральной зоны относительно центра ободка фации. Воздействие лазерного излучения на раствор гистона Н3.2 приводило к незначительным качественным изменениям характера строящихся фрактальных структур и кристаллов. Однако расчёт количественных показателей позволил выявить различия с контрольными образцами по многим параметрам: достоверно увеличивалась площадь периферической зоны фации, отмечалось уменьшение количества гребешковых объектов в 2 раза, что сопровождалось ростом их среднего размера. Кроме того, на 70% уменьшалась степень структурной неоднородности центральной зоны фации. В данной области количество гребешковых объектов увеличивалось, а их средний размер достоверно уменьшался.

Воздействие низкоинтенсивным электромагнитным излучением с частотой 1 ГГц заметно модифицировало фации всех изучаемых образцов. В наименьшей степени отклонения качественных и количественных показателей выявлены у гистонов Н2А и Н2В. Тогда как у остальных фаций наблюдались отчётливые изменения качественных характеристик и достоверные сдвиги количественных параметров. Так, облучение раствора линкерного гистона Н1 низкоинтенсивным ЭМИ с частотой 1 ГГц приводило к уменьшению площади ободочной зоны фации в 13 раз. Достоверно изменялся показатель, характеризующий смещение центра промежуточной зоны относительно центра ободка фации. Отмечалось увеличение количества гребешковых объектов в центральной зоне облучённой фации на 50%, сопровождающееся уменьшением их среднего размера в 4 раза. Воздействие низкоинтенсивного ЭМИ значительно уменьшало степень структурной неоднородности и структурированности типичного фрагмента центральной зоны фации. Существенные различия затрагивали количество и размер гребешковых объектов, расположенных в промежуточной области. Количество объектов уменьшалось в 3 раза, а их размер возрастал на 32%. Данные изменения происходили на фоне уменьшения степени общей структурной неоднородности этой зоны в 23 раза.

Фации контрольных и облучённых образцов гистона Н3.2 также отличались по многим параметрам: достоверно уменьшались количество и средний размер объектов в центральной зоне фации, а также степень структурной неоднородности и структурированности типичного фрагмента центральной зоны фации. Сходные изменения отмечались и в периферической области фации: количество объектов уменьшалось в 3 раза по сравнению с контро-

лем, достоверно возростала структурная неоднородность и структурированность типичного фрагмента данной зоны.

Анализ количественных параметров, отражающие процесс структурообразования гистона H4 при воздействии ЭМИ, выявил достоверные различия по всем исследуемым показателям.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ЭМИ влияет на структурообразование гистонов. При этом существует дифференциальная чувствительность гистонов к действию красного лазера и УВЧ-облучению. Поскольку в наших исследованиях использовались водно-солевые растворы гистонов, то сигнальной молекулой, изменяющей свойства воды и процесс структурообразования при действии лазера, мог служить синглетный кислород. Частота 1 ГГц является одной из воднорезонансных частот, приводящих к изменению структуры воды с образованием фрактальных кластеров. Последнее также может влиять на ее гидратационные свойства и модифицировать процесс структурообразования гистонов.

Библиографический список

1. *Брилль Г.Е., Панина Н.П., Невская Е.Ю.* Действие электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на политенные хромосомы *Chironomus plumosus* // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2000. Т.17, N 1. С. 3-7.
2. *Шабалин В.Н., Шатохина С.Н.* Морфология биологических жидкостей человека // М.: Хризостом. 2001. С.303.
3. *Arya G., Maitra A., Grigoryev S.A.,* A structural perspective on the where, how, why, and what of nucleosome positioning, *J. Biomolec. Structure Dynamics*. 2010. V. 27. N 6. P. 803-820.
4. *Burgess R.J., Zhang Z.,* Histones, histone chaperones and nucleosome assembly // *Protein Cell*. 2010. V. 1. N 7. P. 607-612.
5. *Khorasanizadeh S.* The nucleosome: from genomic organization to genomic regulation // *Cell*. 2004. V. 116. P. 259-272.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ЛОКАЛЬНАЯ ЯМР СПЕКТРОСКОПИЯ В МРТ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

Ю.А.Пирогов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

E-mail: yupi937@gmail.com

На основе новых методов МРТ визуализации, разработанных в ЦМТС МГУ [1-6], были проведены преклинические исследования малых лабораторных животных на 7-Тл биоспектротомографе фирмы Bruker BioSpec 70/30 URS. Их целью было изучить возможности целевой доставки фармпрепарата к очагам онкологического поражения головного мозга [4] и научиться неинвазивно (без хирургического вмешательства, *in vivo*) определять по спектру ЯМР степень поражения тканей живых организмов [5,6].

Первая из указанных задач решалась с помощью липосомных контейнеров, снабженных специфическим биомаркером, ориентированным на опухолевые клетки глиомы С6, и Gd ионами, предназначенными для МРТ обнаружения места нахождения контейнера. Внутри биоконтейнера находился разработанный академиком РАМН В.П.Чехониным лекарственный препарат, подавляющий клетки глиомы С6. Эффективность терапевтического действия препарата была предварительно установлена в экспериментах *in vitro*, так что успешно проведенные МРТ исследования на крысах *in vivo* подтвердили положительный прогноз медиков.

В другом эксперименте была показана возможность релаксации ишемически пораженных участков головного мозга с помощью инъекций мезенхимальных стволовых клеток по методу чл.-корр. РАМН В.И.Скворцовой [6]. Ишемическое образование в головном мозге крысы создавалось посредством окклюзии средней мозговой артерии. В здоровое полушарие вводился экстракт меченых (для МРТ визуализации) парамагнитными ионами железа стволовых клеток, которые проникали в соседнее полушарие и купировали пораженную ишемией область. МРТ наблюдение за этим животным показало, что наряду с реабилитацией его поведенческих функций ишемическое поражение в несколько раз сокращается и функциональная деятельность мозга восстанавливается.

Не менее интересными оказались результаты, полученные при совместном применении опций магнитно-резонансной томографии и ЯМР спектроскопии. Последняя может реализоваться на 7-Тл сканере не только на протонах, но и на ряде тяжелых ядер – ^{13}C , ^{19}F и ^{31}P . Благодаря этому удается локализовать в интересующей ткани воксел с поперечным размером около 2.5-3 мм и произвести в нем 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* локальные метаболический портрет и температуру внутренних органов [5-7]. Такой подход комбинированного применения МРТ и ЯМР спектроскопии (так называемая локальная ЯМР спектроскопия) являет собой неинвазивные аналоги биопсии, метаболомики и внутритканевой термометрии.

Работа выполнена при поддержке российско-тайваньского гранта РФФИ №11-04-92008-ННС_а и гранта Президента РФ на финансирование ведущей научной школы НШ-4593.2008.2.

Библиографический список

1. Анисимов Н. В., Батова С. С., Пирогов Ю. А. Магнитно-резонансная томография: управление контрастом и междисциплинарные приложения / Под ред. Ю. А. Пирогова. – М.: МАКС Пресс, 2013. 243 с.
2. Анисимов Н. В., Пирогов Ю. А., Губский Л. В., Гладун В. В. Управление контрастом и информационные технологии в магнитно-резонансной томографии / Под ред. Ю. А. Пирогова. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2005. 141 с.

3. Юдина А. Ю., Богданов А. А., Пирогов Ю. А. Магнитно-резонансная томография в изучении ангиогенеза и его молекулярных маркеров / Под ред. Ю. А. Пирогова. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2008. 143 с.
4. Yusubalieva G. M., Baklaushev V. P., Gurina O. I., Gulyaev M. V., Pirogov Yu. A., Chekhonin V. P. Antitumor effects of monoclonal antibodies to connexin 43 extracellular fragment in induced low-differentiated glioma // Bull. Exp. Biol. Med. 2012. V. 153(1). P. 163-169.
5. Гуляев М. В., Губский Л. В., Черкашова Э. А., Анисимов Н. В., Чжоу Фушан, Пирогов Ю. А. Локальная ЯМР-спектроскопия в исследованиях ишемии головного мозга // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013. № 1. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/9/text.pdf>.
6. Гуляев М. В., Таурова Р. Т., Губский Л. В., Пирогов Ю. А., Скворцова В. И. Разработка и применение протокола сканирования МРТ на экспериментальной модели фокальной ишемии головного мозга крыс // Материалы 3-го Евразийского конгресса «Медицинская физика-2010». Москва, МГУ, 2010. С.72.
7. Silachev D., Pevzner I., Zorova L., Plotnikov E., Gulyaev M., Pirogov Yu., Isaev N., Skulachev V., Zorov D. New generation of penetrating cations as potential agents to treat ischemic stroke // The FEBS Journal. 2012. V. 279. P. 364.

ФРАКТАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПАТОЛОГИЧЕСКОЙ МОЗГОВОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕТОВЫМИ СТИМУЛАМИ

С.А.Дёмин, И.А.Русанова, О.Ю.Панищев
 Казанский (Приволжский) федеральный университет
 E-mail: serge_demin@mail.ru

Самоподобие, как ключевое свойство, присущее многим природным объектам и живым системам, можно описать с помощью фрактальной размерности – количественной меры геометрической сложности множества (объекта) [1]. Методы фрактального анализа нашли широкое применение в медицинской физике, в частности, при выявлении масштабной инвариантности (скейлинга) и самоподобия биомедицинских сигналов. Использование фрактального анализа в исследованиях патологической активности коры головного мозга человека позволило значительно продвинуться в понимании физиологических механизмов нарушений мозговой деятельности при различных заболеваниях, к примеру, эпилепсии. Изучение самоподобия ритмической мозговой активности позволяет установить характерные особенности доклинических и клинических этапов эпилептогенеза, а также идентифицировать очаги возбуждения, приводящие к различным видам эпилептических припадков. Отдельный интерес для исследования эпилепсии представляют сигналы магнитоэнцефалограммы (МЭГ) человека.

В настоящей работе представлены результаты анализа фрактальной размерности МЭГ-сигналов пациента с фоточувствительной эпилепсией (ФЧЭ). Фоточувствительная эпилепсия – заболевание, при котором наблюдается чрезмерная нейронная активность, возникающая при мерцающих свето-

вых воздействиях и сопровождающаяся различными клиническими и пара-клиническими проявлениями. Широкую известность ФЧЭ получила после массовых случаев возникновения эпилептических приступов в Японии при демонстрации мультсериала «Покемон». Регистрация вызванных МЭГ-сигналов в ответ на стимулы разных цветовых комбинаций (красно-голубой, КГ; красно-зеленый, КЗ; голубой-зеленый, ГЗ) выполнялась установкой Neuromag-122 (*Neuromag Ltd., Finland*) при помощи 61 СКВИД-сенсора (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) с частотой дискретизации 500 Гц [2]. Световые стимулы генерировались проекционной техникой на специальный экран 80 раз по 2 секунды с интервалом 3 секунды. После удаления артефактов временные серии усреднялись. В начале регистрации первые 400 мс (200 изм.) фиксировался контрольный сигнал – световой стимул не подавался, в последующие 1.78 с (201-1095 изм.) осуществлялась подача стимула. В более ранних работах [3,4] на основе методов корреляционного анализа были установлены особенности «реакционной» способности мозга здоровых испытуемых и пациента с ФЧЭ на воздействие красно-голубого стимула, исследованы эффекты статистической памяти и частотно-фазовой синхронизации, реализующиеся при нормальной и патологической мозговой деятельности.

Поиск диагностических признаков ФЧЭ осуществлялся в ходе анализа значений фрактальной размерности D . Расчет указанного параметра проводился следующим образом. Рассмотрим временной ряд дискретных значений $x(t)$. Наложим на кривую n равных модулей (прямоугольников) с длиной основания $\alpha = t_{i+1} - t_i = \frac{N - k}{n}$, так, чтобы полностью её покрыть, где N – количество точек временного ряда, $k = 1, 2, \dots, n$ – начальный отсчет времени. Произведем выборку элементов множества для определения минимальной площади его покрытия, с получением частичных сумм высот модулей $Y(x, \alpha) = \sum_{i=1}^n x(k + i\alpha) - x(k + (i-1)\alpha)$ в виде разности максимального и минимального значений элементов на текущем интервале. В случае присутствия нескольких общих свойств, описание можно провести с помощью ряда фрактальных размерностей [5]. Определим фрактальную размерность D_ξ множества $x(N)$ по свойству $H_\xi(x)$ угловым коэффициентом количества перекрывающихся модулей по величине занимаемой площади $\log Y_\xi \alpha$ от $\log \alpha$:

$$D_\xi = \sum_{\gamma} \frac{\log Y_\xi(x, \alpha_\gamma) \alpha_\gamma - \log Y_\xi(x, \alpha_{\gamma-1}) \alpha_{\gamma-1}}{\log \alpha_\gamma - \log \alpha_{\gamma-1}} \left(\frac{n_\gamma - n_{\gamma-1}}{(N - k)(\alpha_\gamma - \alpha_{\gamma-1})} \right).$$

Построение гистограмм (рис. 1а, 2а, 3а) и топографических карт (рис. 1б, 2б, 3б) для фрактальной размерности D позволяет установить, как меняется активность различных областей головного мозга в случае подачи стимула для пациента, а также способствует установлению областей, деятельность

которых нарушается при ФЧЭ. Кроме того, появляется возможность для исследования изменения самоподобных свойств сигналов-откликов при воздействии разными световыми стимулами. В частности, в случае подачи красно-голубого стимула МЭГ-сигналы пациента характеризуются более высокой степенью самоподобия. Первичное воздействие стимула приводит к последующему усилению «регуляторных» возможностей мозга. В результате подача красно-зеленого и голубого-зеленого стимулов не приводит к существенному изменению значений фрактальной размерности D . Наши дальнейшие исследования будут связаны с изучением воздействия указанных стимулов на мозговую деятельность различных областей мозга здоровых волонтеров.

Представленный метод может найти свое применение в клинической диагностике ФЧЭ, нейрофизиологии, а также когнитивной психологии. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-02-31385 мол_а.

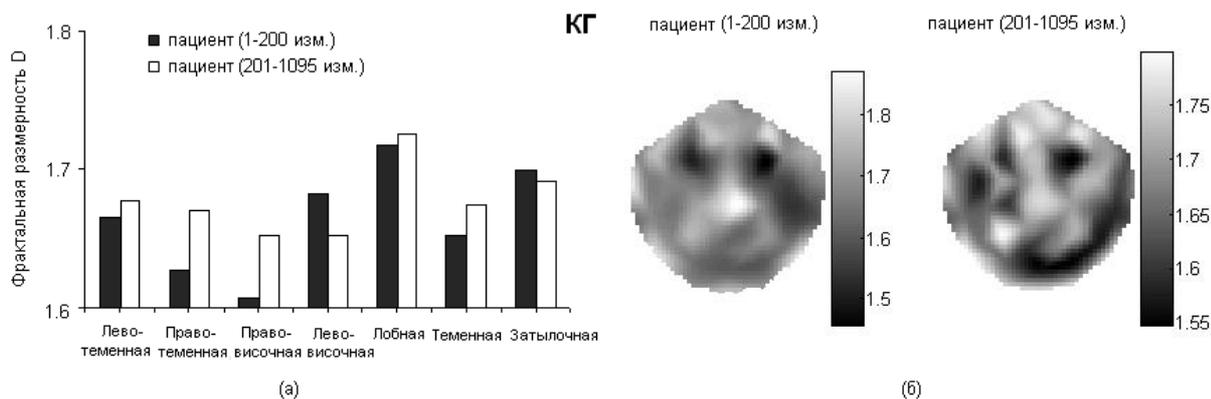


Рис. 1. Гистограмма (а) и топографические карты (б) фрактальной размерности D до и после подачи красно-голубого стимула для МЭГ-сигналов пациента с ФЧЭ

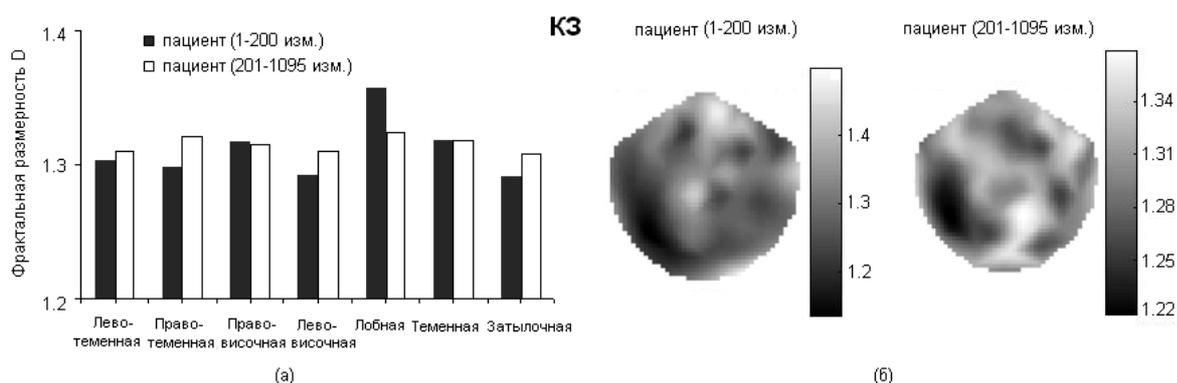


Рис. 2. Гистограмма (а) и топографические карты (б) фрактальной размерности D до и после подачи красно-зеленого стимула для МЭГ-сигналов пациента с ФЧЭ

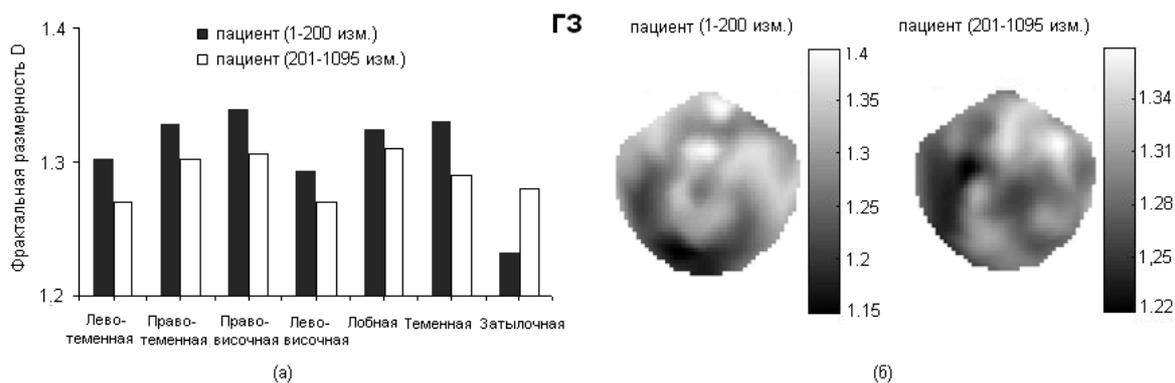


Рис. 3. Гистограмма (а) и топографические карты (б) фрактальной размерности D до и после подачи голубого-зеленого стимула для МЭГ-сигналов пациента с ФЧЭ

Библиографический список

1. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. // San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1982. P460.
2. Bhattacharya J., Watanabe K, Shimojo S. Nonlinear dynamics of evoked neuromagnetic responses signifies potential defensive mechanisms against photosensitivity // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2004. V. 14. P. 2701–2720.
3. Timashev S.F., Polyakov Yu.S., Yulmetyev R.M., Demin S.A., Panishev O.Yu., Shimojo S., Bhattacharya J. Frequency and Phase Synchronization in Neuromagnetic Cortical Responses to Flickering-Color Stimuli // Laser Physics. 2010. V. 20. №3. P. 604–617.
4. Panishev O.Yu., Demin S.A., Bhattacharya J. Cross-correlation markers in stochastic dynamics of complex systems // Physica A. 2010. V. 389. P. 4958–4969.
5. Rusanova I.A. Study of fractal structure of images of nail bed and periungual epithelium // Biomedical Engineering. 2013. V. 47. P. 83–85.

МОДУЛИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА АКТИВНОСТЬ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК

Т.И. Субботина, Е.И. Савин, Д.В. Иванов, А.А. Хадарцев

Тульский государственный университет

E-mail: mbd2@rambler.ru

Целью настоящей экспериментальной работы является выявление закономерностей модулирующего воздействия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на пролиферацию и дифференцировку стволовых клеток *in vivo*.

Материал и методы исследования

Экспериментальные исследования выполнены на беспородных крысах обоих полов в возрасте от 3 до 6 месяцев. Для решения поставленных задач и достижения цели работы все животные были разделены на следующие экспериментальные группы:

1. Первой группе животных вводили цитостатик (фторурацил 0,1 мл) с целью блокады иммунной системы. Затем половине животных в данной группе вводили стволовые клетки. Оставшиеся животные использовались в качестве группы сравнения.

2. Второй группе животных также вводился цитостатик (фторурацил 0,1 мл), после чего по истечении 5 суток вводили стволовые клетки. Часть животных оставляли для группы сравнения. Все животные второй группы подвергались модулирующему воздействию ЭМИ КВЧ частотой 37 ГГц, мощностью 0,5 мВт/см², время однократного облучения составило 30 минут, суммарное время воздействия равняется 180 минутам.

3. В третьей, контрольной группе, использовались интактные животные. Всем животным контрольной группы вводились стволовые клетки по приведенной схеме, затем часть животных подвергалась модулирующему воздействию ЭМИ КВЧ в стандартном для эксперимента режиме.

4. Возможность переноса информации изучалась посредством параллельного воздействия ЭМИ КВЧ с экспериментального животного на контрольное. Одновременно изучалась возможность переноса информации в условиях блокады иммунной системы без введения стволовых клеток и после введения стволовых клеток.

Оценка полученных результатов проводилась на основании морфологического исследования красного костного мозга, селезенки и печени. Печень использована в морфологическом исследовании как орган, участвующий в эмбриональном гемопоэзе, и как орган, относящийся к ретикуло-эндотелиальной системе.

Результаты исследования

В первой экспериментальной группе у всех животных после введения цитостатика в исследуемых тканях выявлены морфологические изменения, свидетельствующие о блокаде иммунной системы. В ткани красного костного мозга выявлены признаки гипоплазии, характеризующиеся уменьшением количества переходных форм (I-III классов) клеток всех ростков красного костного мозга. Гистологическая картина характеризуется мономорфностью клеточного состава, отсутствием четкой метафазной активности низкодифференцированных клеток, практически отсутствуют переходные клетки миелоидного ростка.

В ткани селезенки наблюдается гипоплазия лимфоидных фолликулов и уменьшение их количества, резко снижено количество селезеночных макрофагов.

В ткани печени наблюдается уменьшение количества купферовских клеток, синусоиды и центральные вены расширены. В просвете синусоидов формируется слайдж-феномен, в просвете центральных вен – микротромбы. Отсутствует инфильтрация портальных полей макрофагами и лимфоцитами. Митотическая активность гепатоцитов во всех зонах классических печеночных долек низкая, двухъядерные гепатоциты отсутствуют.

У животных второй группы - с введенным цитостатиком, но подвергшихся воздействию ЭМИ КВЧ, в исследуемых тканях наблюдалась аналогичная морфологическая картина, указывающая на блокаду иммуннокомпетентных клеток.

При облучении ЭМИ КВЧ в сочетании с введением стволовых клеток, зарегистрирована более выраженная положительная динамика морфологиче-

ских изменений, указывающая на активацию процессов пролиферации и дифференцировки иммунокомпетентных клеток. В ткани красного костного мозга наблюдается гиперплазия клеточных элементов, увеличение плюрипотентных клеток и пролиферирующих клеток II-III ряда. Аномально крупные бласты с гипертрофированными ядрами отсутствуют.

Ткань селезенки характеризуется гипертрофией и гиперплазией лимфоидных фолликулов, наблюдается диффузная инфильтрация пульпы лимфоидными клетками.

В ткани печени выявлено увеличение количества синусоидальных клеток, появление макрофагально-лимфоцитарной инфильтрации в портальных полях, присутствует выраженная митотическая активность гепатоцитов во всех зонах классической печеночной доли. Морфологические признаки нарушения микроциркуляции отсутствуют.

Таким образом, полученные результаты в исследуемых экспериментальных группах свидетельствуют о том, что воздействие ЭМИ КВЧ является фактором, стимулирующим пролиферацию и дифференцировку иммунокомпетентных клеток. Морфологические изменения в иммунокомпетентных тканях указывают на преимущественную пролиферацию и дифференцировку лимфоидного и моноцитарного ростков и в меньшей степени миелоцитарного ростка.

Библиографический список

1. Алиева Д.О. Савин Е.И. Субботина Т.И. Яшин А.А. Влияние импульсных электромагнитных полей частотой 8 Гц. на биохимические показатели крови у крыс линии Вистар. // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание.– Тула: Тульский государственный университет, 2013. N 1 (публ. N 2-154, <http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2013-1/4611.pdf>)
2. Савин Е.И., Исаева Н.М., Купеев В.Г., Субботина Т.И., Яшин А.А. Применение корреляционно-регрессионного анализа для исследования активности свободно-радикальных процессов под воздействием электромагнитного излучения, введения фитомеланина и стволовых клеток // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т.ХVIII,№4. с. 48-51.
3. Савин Е.И., Алиева Д.О., Иванов Д.В., Морозов В.Н., Субботина Т.И., Хадарцев А.А., Яшин А.А. Влияние ЭМИ КВЧ и стволовых клеток на регуляцию свободно-радикальных процессов в условиях экспериментальной гипоплазии красного костного мозга // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т.ХVIII,№1. с. 193-194.
4. Савин Е.И., Алиева Д.О., Иванов Д.В., Морозов В.Н., Субботина Т.И., Хадарцев А.А., Яшин А.А. Сравнительный анализ модулирующих эффектов при воздействии на организм ЭМИ КВЧ в сочетании с введением стволовых клеток и фитомеланина. // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т.ХVIII,№1. с. 194-197.
5. Субботина Т.И., Туктамышев И.Ш., Яшин А.А. Электромагнитная сигнализация в живой природе. -Тула: Изд-во «Гриф и К», 2003. 319 с. (Серия «Электродинамика и информатика живых систем». Т.3.).
6. Субботина Т.И., Хадарцев А.А., Яшин М.А. и др. Влияние высокочастотного низкоинтенсивного облучения репродуктивную функцию мышечной линии C57//B16 и рандомбредных мышей // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2004. Т.138. №11. с.626-628.

7. Субботина Т.И., Хадарцев А.А., Яшин М.А. и др. Воздействие вращающихся электромагнитных полей как фактор изменения протеолитической активности пепсина у крыс // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.-2004. т.137. №6. с.714-716.
8. Субботина Т.И., Хадарцев А.А., Яшин М.А. и др.. Управление протеолитической активности пепсина при воздействии вращающимся магнитным полем мышей // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.-2005.-Т.139. №3. с.294-296.
9. Хасая Д.А. Особенности активности свободно-радикальных процессов при воздействии электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на живой организм// VIII МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов»: материалы конференции. - СПб, 2009. с.346-347.
10. Электромагнитобиология и клинический эксперимент в физиотерапии/ И.Г. Герасимов и др.; под ред. Т.И. Субботиной, А.А. Яшина. - М.; Тула; Тверь: ООО «Издательство «Триада», 2008. 184 с.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ В ПЛОСКОПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ РАСТВОРОВ ХИТОЗАНА В ВОДНО-КИСЛОТНЫХ ФАРМАКОПЕЙНЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ

О.Н. Малинкина¹, В.И. Фомина¹, А.Б. Шиповская^{1,2}

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

¹ ОНИ НС и БС, отдел высокомолекулярных соединений

² Институт химии, базовая кафедра полимеров

E-mail: olga-malinkina@yandex.ru

Получение водорастворимых и биологически активных производных природных полисахаридов, в частности хитозана, способствует становлению и развитию новых подходов в медикаментозной терапии, стимулирующих иницирование собственных защитных процессов организма, направленных на самоисцеление. С целью повышения биологической активности в настоящее время всё большей популярностью пользуются многокомпонентные системы, содержащие, кроме полисахарида, и лекарственные вещества. Ввиду этого для перевода хитозана в водорастворимую форму нами были выбраны несколько биологически активных органических кислот фармакопейного ряда – одноосновные оптически активные аскорбиновая и молочная кислоты, а также оптически неактивная двухосновная янтарная кислота, выполняющие важную роль в метаболизме живого организма и широко используемые в пищевой и косметической промышленности в качестве антиоксиданта Е 300, консерванта Е 270 и антиокислителя Е 363 соответственно.

Для большинства биологически активных соединений существует тесная взаимосвязь между биологической активностью и их пространственной структурой [1], для установления которой используют оптические методы, в частности спектрополяриметрию. Однако имеющиеся в литературе исследования растворов хитозана касаются только его спектрополяриметрического поведения в присутствии уксусной и соляной кислот [2-4]. В работе [2] получены кривые дисперсии оптического вращения (ДОВ) для различных молекулярных масс полимера. В статье [3] изучено влияние температуры, рН рас-

творителя и ионной силы растворителя на величину удельного оптического вращения растворов ($[\alpha]_{\lambda}$). В работе [4] исследовано влияние концентрации полимера ($C_{\text{п}}$) на конформацию макромолекул хитозана в уксусной кислоте. Данных по определению оптической активности растворов хитозана в кислотах фармакопейного ряда в литературе не обнаружено.

Цель настоящей работы – изучение методом спектрополяриметрии оптических свойств разбавленных растворов хитозана в водно-кислотных растворителях на основе органических оптически активных и неактивных кислот с разной степенью кислотности, а именно – аскорбиновой ($C_6H_8O_6$), молочной ($C_3H_6O_3$) и янтарной ($C_4H_6O_4$) кислот, обнаружение особенностей поведения данных растворов в плоскополяризованном свете.

Объекты исследования – свежеприготовленные растворы хитозана ($\overline{M}_{\eta} = 200$ кДа, СД = 82 мольн.%, ЗАО «Биопрогресс») концентрации $C_{\text{п}} = 0.3$ г/дл в водных растворах аскорбиновой, молочной и янтарной кислот (х.ч.) в диапазоне концентраций $C_{\text{к}} = 1.0 - 10.0$ г/дл.

Спектры оптической активности растворов регистрировали на автоматическом спектрополяриметре PolAAr 3001 фирмы Optical Activity Ltd (GB) в интервале длины волны $\lambda = 365 - 589$ нм в термостатируемой кювете при температуре 25°C . Удельное оптическое вращение растворов ($[\alpha]_{\lambda}$, град·мл·дм $^{-1}$ ·г $^{-1}$) определяли по формуле (1):

$$[\alpha]_{\lambda}^{25^{\circ}\text{C}} = \frac{(\alpha - \alpha_0) \cdot 100}{C_{\text{п}} \cdot l}, \quad (1)$$

где α – измеряемый угол оптического вращения раствора, град; α_0 – измеряемый угол оптического вращения растворителя, град; $C_{\text{п}}$ – концентрация полимера в растворе, г/дл; l – длина оптического пути, дм. Погрешность измерения углов оптического вращения составила ± 0.001 град.

Экспериментальные кривые ДОВ обрабатывали с применением одночленного уравнения Друде (2):

$$[\alpha]_{\lambda}^T = \frac{K}{\lambda^2 - \lambda_0^2}, \quad (2)$$

где K и λ_0 – вращательная и дисперсионная константы. Для определения констант использовали графические преобразования Лоури (зависимость $1/[\alpha] - \lambda^2$), Янга - Доти ($[\alpha] \cdot \lambda^2 - [\alpha]$) и Геллера ($1/[\alpha] \cdot \lambda^2 - 1/\lambda^2$).

Следует отметить, что в коротковолновой области спектра разброс значений более существенен (до ± 20 град·мл·дм $^{-1}$ ·г $^{-1}$), чем в длинноволновой (± 2 град·мл·дм $^{-1}$ ·г $^{-1}$), что может свидетельствовать о наличии полосы поглощения раствора полимера в ближней ультрафиолетовой части спектра. Из представленных на рисунке кривых ДОВ можно видеть, что кривая 1 находится в положительной области значений оптического вращения, в то время как кривые 2 и 3 – в отрицательной. Из литературных источников известно, что растворы хитозана в органических и неорганических кислотах (CH_3COOH , HCl) имеют только отрицательные значения удельного оптического вращения [2-4]. Положительные же значения характерны для растворов олигомеров хитозана, начиная с тетрамера, у которых преобладает противовирусная активность, в от-

личие от антибактериального действия полимеров хитозана, и мономера *N*-глюкозамина [2].

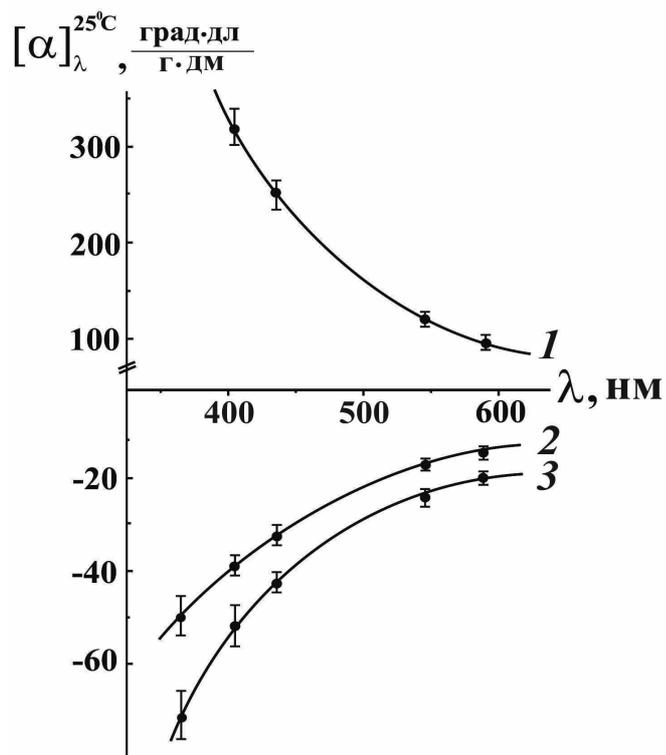


Рис. – Усреднённые кривые ДОВ растворов хитозана $C_{\text{п}} = 0.3$ г/дл в аскорбиновой (1), янтарной (2) и молочной кислоте (3) в диапазоне $C_{\text{к}} = 1.0 - 10.0$ г/дл

Обсуждение результатов

Проведённые измерения значений удельного оптического вращения для нескольких серий растворов хитозана показали, что кривые ДОВ относятся к нормальному типу, т.е. не имеют перегибов и инверсии знака вращения. Во всём исследуемом диапазоне концентраций воднокислотных растворителей влияние $C_{\text{к}}$ кислоты на величину оптического вращения не обнаружено (в пределах допустимых флуктуаций). Кривые ДОВ, построенные в результате усреднения по для серии растворов хитозана в аскорбиновой, янтарной и молочной кислотах ($C_{\text{к}} = 1.0 - 10.0$ г/дл), приведены на рисунке.

В результате обработки кривых ДОВ, используя преобразования Лорри, Янга-Доти и Геллера, графически определили величины вращательных и дисперсионных констант в одночленном уравнении Друде. Поскольку нами не обнаружено влияния концентрации низкомолекулярного аниона в растворе на величину оптического вращения, для каждой серии растворов были рассчитаны средние значения \bar{K} и $\bar{\lambda}_0$ (табл.).

Таблица

Значения удельного оптического вращения, вращательных и дисперсионных констант уравнения Друде растворов хитозана в аскорбиновой, молочной и янтарной кислотах

| $C_{\text{п}}$, г/дл | Растворитель | $C_{\text{к}}$, г/дл | град·мл·дм ⁻¹ ·г ⁻¹ | \bar{K} | $\bar{\lambda}_0$, нм |
|-----------------------|--------------|-----------------------|---|--------------------------------|------------------------|
| 0.3 | $C_6H_8O_6$ | 1.0 – 10.0 | +96±5 | $(2.6 \pm 0.3) \cdot 10^7$ | 261±18 |
| | $C_3H_6O_3$ | | -23±3 | $(-2.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-7}$ | 278±6 |
| | $C_4H_6O_4$ | | -14±2 | $(-4.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-6}$ | 233±14 |

Таким образом, проведённая работа показывает, что взаимодействие хитозана с аскорбиновой кислотой пространственно отличное от взаимодействия с другими органическими и неорганическими кислотами. Возможно, именно этим объясняется синергетический эффект высокого лечебного действия многокомпонентных систем на основе хитозана и аскорбиновой кислоты.

Библиографический список

1. Смирнова И.Г., Гильдеева Г.Н., Кукес В.Г. Оптическая изомерия и биологическая активность лекарственных средств // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2012. Т. 53. № 3. С. 147-156.
2. Шиповская А.Б., Фомина В.И., Казмичева О.Ф., Тимофеева Г.Н., Комаров Б.А. Влияние молекулярной массы на оптическую активность хитозана // Высокмолек. соедин. 2007. Т. 49 Б. № 12. С. 2195-2199.
3. Шиповская А.Б., Казмичева О.Ф., Тимофеева Г.Н. Дисперсия оптического вращения растворов хитозана // Структура и динамика молекулярных систем: Сб. статей. Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ. 2002. Вып. IX. Т. 2. С. 293-296.
4. Koralewski M., Bodek K.H., Marczewska K. Optical properties of chitosan in aqueous solution // Polish. Chitin. Soc. 2006. Monograph XI. P. 29-39.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ЛЕЧЕБНЫХ ЦЕЛЕЙ: СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССОВ, МЕТОДОВ И МЕХАНИЗМОВ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*Ю.М.Брумштейн, В.М.Сокольский, Е.В.Скляренко, Т.А. Журнова,
А.С.Федорец*

Астраханский государственный университет
E-mail: brum2003@mail.ru

В медицине человека для оказания лечебных целей широко используются электромагнитные поля (ЭМП). Данная работа представляет аналитический обзор направлений применения ЭМП, особенностей их взаимодействия с биообъектами, номенклатуры соответствующего оборудования. Рассмотрение осуществляется в порядке уменьшения длин волн (ДВ).

Инфитатерапия (ИТ) – «лечение импульсным низкочастотным (10-80, 120 Гц) ЭМП низкой интенсивности и негативной полярности» [5]. По [5] ИТ «можно считать методом биорезонансной терапии», причем первичные механизмы ее воздействия остаются дискуссионными. «Они находятся в области электромагнитной индукции, ее влияния на биологические субстраты с ферромагнитными включениями, поляризацию ядер и электронов» [5]. Ответные физиологические реакции связаны с рефлекторной реакцией организма. Оборудование: «Инфита» и его модификации.

Индуктотермия – «используется высокочастотное магнитное поле с преобладанием магнитной составляющей (85%)» [5]. Механизм воздействия связан с разогревом тканей за счет появления в них наведенных вихревых токов. Оборудование: «ИКВ-4» - дает ЭМП с «преимущественно магнитной составляющей (13.56 МГц)». Есть также индукторы к аппаратам УВЧ-терапии для частоты 40.68 МГц (УВЧ-индуктотермия) [5].

В рамках **коротковолновой диатермии** (КДВ) воздействие осуществляется «непрерывным или импульсным электрическим полем частотой» 27.12 или 40.68 МГц [5]. При этом поглощение энергии осуществляется за счет передвижения ионов и релаксационных колебаний дипольных молекул

белка, гликолипидов, гликопротеидов, фосфолипидов [5]. Преимущество КДВ – большая глубина проникновения в тело человека.

При **ДМВ-терапии** осуществляют облучение ЭМП дециметрового диапазона ДВ (0,1-1м) [1,3]. Согласно [5] - используются излучения с частотами 433 МГц (ДВ – 69.3 см); 460 МГц (65 см) и 918 МГц (32.7 см). Глубина проникновения в организм человека таких волн ограничивается 13 см. По [5] «поглощение ДМВ в основном связано с колебаниями молекул структурированной (связной) воды, которые входят в структурную основу мембран и примембранных слоев, имеют характеристические частоты в диапазоне ДМВ». Действие ДМВ высокой интенсивности «сводится к дезинтеграции жидкокристаллической структуры связанной воды, увеличению доступа инициаторов перекисного окисления липидов во внутренние области мембраны и к ее деструктуризации». В конечном счете, это «приводит к снижению функциональной активности клетки в целом». Для ДМВ-терапии используются переносные аппараты мощностью до 25 Вт («ДМВ-20-1 Ранет», «ДМВ-15 «Ромашка») [5], передвижные – до 250 Вт («ДМ-61», «Волна-2М» и др.) [1] (в [5] «Волна-2М» отнесена к стационарным).

СМВ-терапия – облучение ЭМП сантиметрового диапазона - обычно 2375 МГц (12.6 см) и 2540 МГц (12.5 см) [1,5]. Глубина «проникновения в тело пациента 3-5 см, а по некоторым данным и до 7 см» [5]. «Поглощение СМВ связано, в основном, с диэлектрическими потерями, вызванными, главным образом, вращением дипольных молекул воды, но в отличие от ДМВ, свободной воды, а не связанной» [5]. Для СМВ-терапии используются различные модели оборудования [1,5]: «СМВи-200-МедТеКо», «СМВ-20-2 Луч-2», «СМВ-20-2 Луч-4», «СМВ-150-Луч-11» и др. Большая часть такого оборудования – переносное, но оно применяется, и в качестве стационарного.

Характерный диапазон работы **сотовых телефонов** (СТ) стандарта GSM в России сейчас 1800 МГц, т.е. близок к диапазону СМВ-терапии. При применении СТ без blue-tooth гарнитур (т.е. при непосредственном примыкании СТ к ушной раковине) облучение, как считается, может оказывать неблагоприятное воздействие на мозг человека. Поэтому для детей использование СТ обычно ограничивают. Есть и разработки, уменьшающие воздействие ЭМП от СТ на мозг. Они основаны на использовании специальных «диполей»; чехлов, частично экранирующих корпус СТ от головы человека и пр. (однако при этом уменьшается и «полезная мощность», излучаемая СТ).

В **КВЧ-терапии** применяется ЭМП с ДВ 5-7 мм (частоты 57-65 ГГц) [1]. В [5] используется термин ММВ-терапия и дается диапазон ДВ в 4-8 мм. По [5] «кожа человека более чем на 60% состоит из воды», поэтому КВЧ-излучение «почти полностью поглощается до глубины менее 1 мм». Основной лечебный эффект от КВЧ-терапии по [1] адаптационный (нормализация гомеостаза и основных систем регуляции биологических процессов). По [5] биологический эффект КВЧ волн «может быть связан с микротепловым массажем кожных рецепторов», «происходит синхронизация угасающих колебаний в мембранах клеток и восстановление их до нормального уровня». В качестве оборудования для КВЧ-терапии отметим: «ГЗ-142 Порог-1», «Явь-1-

7», «АМФИТ-0,2», «КВЧ-710», «Электроника-КВЧ-101», «Магنون-КВЧ», «Стелла-2» (на диапазон 59-63ГГц).

Инфракрасное (ИК) облучение - диапазон ДВ от 760 нм до 400 мкм. Для терапевтических целей используется преимущественно «ближняя ИК область» (760-1500 нм). По [1] при типичных процедурах лечения ИК-излучением основная доля энергии поглощается в пределах 3-4 см и только 20-25% достигают глубины 6 см. Тепловой нагрев кожных покровов и прилежащих тканей приводит к изменению «тонуса капилляров и функциональных свойств термомеханочувствительных афферентных проводников» [5]. Считается, что ИК-облучение обеспечивает противовоспалительные эффекты; ускорение регенерации тканей; в ряде случаев – седативное и анальгезирующее действие. Простейшее устройство для ИК-облучения - лампа накаливания из «синего» стекла и полусферический рефлектор на ручке («рефлектор Минина») - начиная с 1990-х годов в России уже не выпускается. Современное оборудование: лампы Соллюкс (стационарные, передвижные, настольные), «Гравитон», «ЛСМ-1М» и др. В ИК-саунах применяются ИК-излучатели плюс автоматика динамического управления их мощностью.

Хромотерапия (ХТ) - воздействие некогерентным излучением видимого диапазона (760-400 нм). Принято различать «неселективное облучение» (в спектре - все цвета) и «монохроматическое» (только один цвет). Цвета по-разному действуют на активность нервной системы: голубой и синий – снижают ее; розовый и красный – стимулируют. Для людей, живущих за полярным кругом, моряков-подводников и пр. «годовой дефицит» светового излучения необходимо «восполнять» ярким искусственным освещением. При этом в пакетах ламп дневного света целесообразно комбинировать лампы с «холодным» голубоватым свечением и более «теплым» - бледно розовым. Из специального медоборудования для ХТ наиболее известны лампы «Соллюкс» (в т.ч. с разными цветами излучения), «Биоптрон», «Спектр» (красный, синий, зеленый). Специальные ХТ-облучатели применяются для новорожденных. Для селективной ХТ ранее использовались в основном устройства на основе ламп накаливания с наборами светофильтров, что неэффективно по энергозатратам. Сейчас как «энергосберегающая» альтернатива могут применяться светодиодные сборки. Однако набор цветов, обеспечиваемый выпускаемыми светодиодами, пока достаточно ограничен.

Светодиоды применяются и в рамках «комбинированных контактных устройств», воздействующих на поверхность кожи не только светом, но и электрическим током, вибрацией и пр. Их использование особенно характерно для косметологических кабинетов, реабилитационных центров и пр.

Гелиотерапия – (ГТ) лечение естественным солнечным излучением (СИ), «солнечные ванны». СИ включает ИК часть спектра (45-50% по мощности - [5]), видимую и ультрафиолетовую. На уровне моря большая часть УФ лучей уже поглощена, особенно если воздух пыльный. Отметим, что ГТ: может быть важной частью курортологических процедур. Однако она возможна только в теплое время года, при отсутствии дождя, тумана и пр.

В **ультрафиолетовом (УФ) излучении** выделяют три зоны [1]: коротковолновую (КУФ) – 275-180 нм; средневолновую (СУФ) – 320-275 нм; длинноволновую (ДУФ) - 400-320 нм. Воздействие ДУФ стимулирует образование в коже зерен меланина (т.е. загар); обладает иммуностимулирующим действием [1,5]. Оборудование: лампы для загара «Cleo PL», «Ergoline» и др. - применяется не только в медучреждениях (включая косметологические клиники), но и в коммерческих соляриях, «студиях загара» и т.п.

Фотохимиотерапия (ФХТ) - это применение ДУФ-облучения в сочетании с приемом пациентами (перорально или парентерально) химсоединений фурукумаринового ряда [1], которые при облучении взаимодействуют с ДУФ. Оборудование для ДУФ-терапии – «УУД-1-А», «УФО-1500».

В [4] для ФХТ используется термин «**фотодинамическая терапия**». Указывается, что этот метод применяется в основном в онкологии, причем источником излучения обычно служит лазер. При этом по [4] основное действие оказывает «синглетный кислород, являющийся мощнейшим окислителем для различных структур клетки, в особенности для мембранных белковых и липидных комплексов...вызывает их гибель».

В рамках **СУФ** обеспечивается не только образование в коже зерен меланина, но и витамина «D₃», а также стимулируется обмен веществ. В качестве аппаратуры обычно используются дуговые ртутные трубчатые лампы, кварцевые облучатели, ксеноновые лампы и пр.

При **КУФ-терапии** осуществляется локальное облучение участков кожи, слизистых пораженных органов, а также крови. В качестве лечебных эффектов обычно отмечают [1]: бактерицидный, микоцидный, иммуностимулирующий, гипокоагулирующий (для КУФ-облучения крови). Интегральные источники - для внутрисполостного облучения «ОУП-1», «ОУП-2»; для слизистых оболочек – «БОП-4,5». Используются также настенные, потолочные и передвижные бактерицидные излучатели (прежде всего, для обработки воздуха). Для обработки крови – аппараты «МД-73М», «Изольда» и др.

В **лазеротерапии** применяются твердотельные, газовые, полупроводниковые когерентные излучатели, обычно - непрерывного действия. Объекты воздействий: кожа человека; внутренние органы (через световоды); кровь (внутривенное облучение и с «временным выведением ее из организма»). При низкоинтенсивном лазерном излучении имеет место внутренний фотоэффект и электролитическая диссоциация ионов. Лечебное действие на кожу носит комплексный характер, в т.ч. и противовоспалительное. Кроме того термин «лазеротерапия» оказывает важное психологическое воздействие на пациентов. Аппаратура: гелий-неоновые лазеры: «АФЛ-1»; «ФАЛМ-1». ИК-лазеры: «Узор», «Улей» и др. Комбинированные полихроматические установки: «Мустанг 2000+», «Лотон», «Рикта», «Мулат».

Внутривенное лазерное облучение крови (ВЛОК), эффективно для весьма широкого спектра заболеваний [2]. Его воздействие определяется «влиянием на низший (субклеточный и клеточный) уровень регулирования и поддержания гомеостаза», «а при возникающих нарушениях» ВЛОК «корректирует и стратегию адаптации (физиологических реакций) более высокого

уровня организации живого» [2]. Оборудование - «Матрикс-Влок», позволяющий проводить облучение с несколькими ДВ (от 0.36 до 0.9 мкм – т.е. в ультрафиолетовом, видимом, ИК диапазонах) и с мощностью от 1 до 35 мВт.

Для лазерной литотрипсии (дробления мочевых и иных камней) применяются «лазеры на красителях». Типична ДВ 520 нм и светодоводы в виде тонкого кварцевого волокна. В месте воздействия луча образуются пузырьки. При их «увеличении и схлопывании» образуются ударные волны, дробящие камни. Гольмиевый лазер на иттриево-алюминиевом гранате использует ДВ 2090 нм, кварцевое волокно низкой плотности диаметром 200-1000 мкм. Жидкость, находящаяся в фокусе системы, испаряется при лазерных импульсах. Передача энергии происходит через «полости с паром» (эффект Мозеса). Энергия, поглощаемая камнем, приводит к его «терморазрушению».

Высокоинтенсивное непрерывное лазерное излучение применяется в лазерных скальпелях (ЛС). По сравнению с электрокоагуляторами/электроножами у ЛС есть преимущества: возможно бесконтактное воздействие на кожу/ткани; диаметр луча может изменяться. Недостаток: хирург «не чувствует сопротивления» разрезаемой ткани.

Значительны достижения в лазерной микрохирургии глаза (используется, как правило, импульсное излучение). Отметим, в частности, возможности лечения глаукомы, отслоения сетчатки и пр. Преимущества лазерного луча (по сравнению с традиционным «офтальмологическим скальпелем»): малый диаметр «пятна», что позволяет проводить более «тонкие» операции; меньшие требования к «качеству моторики» кистей рук хирурга и пр.

Рентгеновское излучение (РИ) имеет ДВ 0,005—10 нм и используется для диагностики, терапии и хирургии. Необходимые ДВ РИ обеспечивают трубки с разными материалами анодов, а мощности – изменения величины тока. РИ может также создаваться с использованием ускорителей частиц.

Для лечения заболеваний кожи применяют т.н. «ультрамягкое» РИ. Для короткодистанционной рентгенотерапии (РТ) при «кожно-фокусных» расстояниях 3—7 см используются напряжения 20—60 КВ, а при «дистантной» РТ (для «кожно-фокусного» расстояния 30—150 см) – большие напряжения. В последнем случае часто используются «излучающие головки», движущиеся по сложным траекториям – но так, чтобы облучаемый объект все время был на пути луча. Введение в организм человека веществ-сенситизаторов, избирательно накапливающихся в опухолях, в ряде случаев позволяет значительно повысить эффективность РТ.

Хирургические применения РИ: рентгенохирургия (проведение операций, включая эндоскопические, под контролем РИ - в т.ч. и при эндоваскулярной хирургии); «кибернож», использующий линейный ускоритель электронов для получения точно перемещаемого узкого пучка РИ.

Гамма излучение (ГИ) более коротковолновое, чем РИ. Применяется для лечения онкологических заболеваний. Механизм воздействия ГИ – уничтожение клеток, путем прекращения их деления за счет «нарушения» ДНК (ионизация атомов ДНК, радиолитиз воды и пр.). Ионизирующее излучение создает пероксид водорода, свободные радикалы, которые и воздействуют на

ДНК. Возможные варианты использования ГИ: облучение организма от внешнего источника (в т.ч. подвижного – аналогично РИ); введение в опухоль специальных игл с радиоактивными веществами (РВ) в капсулах на их концах (ранее использовались «радиевые иглы», сейчас – в основном, с «искусственными» изотопами РВ); введение в организм «микрокапсул» или «микронитей» с РВ и др.). Воздействие на опухоли осуществляется не только ГИ, но и за счет альфа- и бета-частиц, образующихся при распаде РВ.

Библиографический список

1. *Аверьянова Н.И., Шипулина И.А.* Основы физиотерапии // Ростов на Дону:Феникс. 2010. С.213.
2. *Гейниц А.В., Москвин С.В., Ачилов А.А.* Внутривенное лазерное облучение крови. // М. Тверь: ООО «Издательство Триада», 2008. С.144.
3. *Улащик В.С.* Физиотерапия. Универсальная медицинская энциклопедия // Минск: Книжный дом. 2012 С.640.
4. *Улащик В.С.* Физиотерапия. Новейшие методы и технологии: Справочное пособие. Минск: Книжный дом. 2012. С.640.
5. Физиотерапия и курортология. /Под ред. В.М.Боголюбова. Книга 1. // М. Издательство БИНОМ. 2008. С.408.

КИНЕТИКА НАГРЕВА ОПУХОЛЕЙ И ОКРУЖАЮЩИХ ТКАНЕЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ БЛИЖНЕГО ИК СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ПРИ ВВЕДЕНИИ В ТКАНЬ ЗОЛОТЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТЕРЖНЕЙ

*Д.К. Тучина¹, А.Н. Башкатов¹, Э.А. Генина¹, А.Б. Бучарская², Г.С. Терентюк²,
В.Д. Генин¹, М.В. Баско², Н.Г. Хлебцов³, Б.Н. Хлебцов³, В.В.Тучин¹*

¹Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

³Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН

E-mail: tuchinadk@mail.ru

Введение

Термоабляция представляет собой направленное локальное изменение температуры опухолевой ткани, следствием чего является ее некротизация и обширная деструкция. Главным недостатком термоабляции является низкая селективность термического воздействия, вследствие чего повреждаются здоровые биоткани, граничащие с опухолью. Повысить селективность и локальность нагрева можно с помощью введения в опухоль наноразмерных термосенсибилизаторов, в роли которых могут быть использованы золотые наночастицы.

Целью работы являлось исследование кинетики нагрева опухолей и окружающих биотканей при введении в биоткань золотых наноконпозитов на основе наностержней.

Материалы и методы

В эксперименте использовали белых беспородных крыс-самцов массой 180-200 г (5 групп по 6 особей в каждой группе), перевиваемую опухоль альвеолярного рака печени РС-1 (банк опухолевых штаммов Российского онкологического научного центра им. Н.Н. Блохина РАМН). Перед началом эксперимента крысы подвергались местной анестезии, шерсть с поверхности кожи с опухолью удаляли, после чего интратуморально вводили суспензию конъюгатов золотых наностержней и гематопорфирина (таблица 1). Объем вводимой суспензии составлял 30% от общего объема опухолевой ткани, для равномерного распределения наночастиц по всему объему биоткани суспензия вводилась в разные точки.

Таблица 1. Описание контрольных и экспериментальных групп

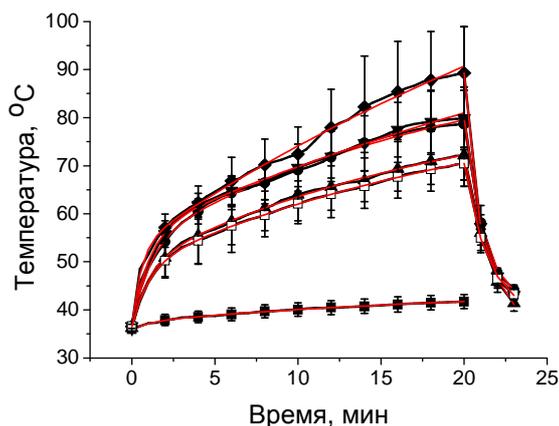
| Группа | Описание |
|----------|---|
| Контроль | Опухоли объемом порядка 3 см^3 . Интратуморальное введение физиологического раствора. Облучение ИК-лазером, одна точка облучения. |
| 1 | Опухоли объемом порядка 3 см^3 . Интратуморальное введение суспензии наноконпозитов. Облучение только ИК-лазером. Две точки облучения. |
| 2 | Опухоли объемом порядка 3 см^3 . Интратуморальное введение смеси из: золотых наностержней и гематопорфирина. Одновременное облучение красным лазером и ИК-лазером. 2 точки облучения |
| 3 | Опухоли объемом порядка 3 см^3 . Интратуморальное введение раствора наноконпозитов: золотых наностержней конъюгированных с гематопорфирином. Одновременное облучение красным лазером и ИК-лазером. 2 точки в центре опухоли |
| 4 | Крупные опухоли объемом порядка 10 см^3 . Интратуморальное введение раствора наноконпозитов: золотых наностержней конъюгированных с гематопорфирином. Одновременное облучение красным лазером и ИК-лазером. 6 точек (2 точки в центре опухоли, 4 точки по периферии опухоли). |

Опухоль 20 минут облучалась одним или одновременно двумя лазерами, плотность мощности красного (632.8 нм) и ИК-лазера (808 нм) составляла 0.86 мВт/см^2 и 2.3 Вт/см^2 . Температура поверхности кожи фиксировалась каждые 30 секунд в процессе облучения и в течение 3 минут после облучения при помощи ИК-тепловизора.

Результаты

На рис. 1 представлена кинетика нагрева и остывания биотканей пяти экспериментальных групп животных, подвергнутых облучению при введении в ткани опухолей различных наноконпозитов. Видно, что экспериментальные данные достаточно хорошо аппроксимируются уравнениями (1) и (2). Минимальный рост температуры наблюдается в контрольной группе, максимальный рост температуры наблюдался при освещении центра опухоли объемом до 10 см^3 . Освещение этих же опухолей в 4-х точках, расположенных по периферии опухоли, показывает относительно небольшой рост температуры.

Рис. 1. Кинетика нагрева и остывания тканей животных контрольной (■) и 4-х экспериментальных групп (● – 1; ▲ – 2; ▼ – 3; ◆ – 4 (освещение центра опухоли); □ – 4 (освещение периферии опухоли)). Сплошные линии соответствуют аппроксимации экспериментальных данных уравнениями (1) и (2)



Параметры аппроксимации экспериментальных данных по кинетике нагрева уравнением (1) и остывания уравнением (2) представлены в таблицах 2 и 3.

$$T(t) = A_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) + A_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right) + T_0.$$

T_0 – температура в начальный (до нагрева) момент времени, A_1 и A_2 – эмпирические константы, τ_1 и τ_2 – константы скорости нагрева кожи и опухоли.

$$T(t) = A \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) + y_0, \quad (2)$$

A и y_0 – эмпирические константы, τ – константа скорости остывания кожи и опухоли, t_0 – время прекращения нагрева (20 мин).

При анализе кинетики предполагалось, что первый член уравнения (1) связан с нагревом кожи и окружающей опухоль ткани, а нагрев опухоли описывается вторым слагаемым уравнения. Из приведенных данных видно, что нагрев кожи происходит значительно быстрее ($\tau_1 \approx 1$ мин), чем нагрев опухоли ($\tau_2 = 21.5 \pm 1.5$ мин), особенно при введении в опухоль наностержней, конъюгированных гематопорфирином ($\tau_2 \approx 44.8 \pm 3.9$ мин), однако в этом случае имеет место более сильный рост температуры. Сравнение кинетики нагрева 1 и 2 групп показывает, что введение в опухоль гематопорфирина приводит к меньшему нагреву опухоли, что, очевидно связано с более сильным поглощением гематопорфирина на длине волны 808 нм, по сравнению с поглощением нативной ткани.

Таблица 2. Параметры кинетики нагрева

| Группа | Параметры аппроксимации | | | | |
|---------------|-------------------------|--------------|----------------|----------------|--------------------|
| | A_1 | A_2 | τ_1 , мин | τ_2 , мин | $y_0 \cong T(t=0)$ |
| Контроль | 1.488±0.125 | 7.247±0.541 | 1.101±0.167 | 22.161±3.37 | 35.94±0.07 |
| 1 | 17.1±0.818 | 42.53±3.081 | 1.087±0.094 | 20.988±3.26 | 36.34±0.437 |
| 2 | 12.903±0.422 | 26.438±1.403 | 0.98±0.06 | 19.774±1.689 | 36.165±0.243 |
| 3 | 19.163±0.758 | 73.065±19.57 | 1.051±0.081 | 47.593±16.91 | 36.774±0.472 |
| 4 (центр) | 16.272±0.987 | 99.42±18.525 | 0.576±0.079 | 42.095±10.49 | 36.815±0.773 |
| 4 (периферия) | 12.359±0.231 | 37.664±1.153 | 1.039±0.036 | 23.253±1.373 | 36.506±0.131 |

Из таблицы 2 видно, что скорость нагрева опухоли при введении неконъюгированных гематопорфирином наностержней примерно в два раза больше, чем при конъюгации наностержней гематопорфирином.

Анализ кинетики остывания биоткани после выключения ИК-лазера (см. таблицу 3) показывает, что спад температуры происходит по экспоненциальному закону со скоростью, сравнимой со скоростью нагрева кожи и окружающих опухоль биотканей (таблица 2).

Таблица 3. Параметры кинетики остывания

| Группа | Параметры аппроксимации | | |
|---------------|-------------------------|--------------|--------------|
| | A | τ , мин | Y_0 |
| 1 | 38.514±1.432 | 1.275±0.118 | 40.275±1.388 |
| 2 | 37.793±2.188 | 1.733±0.216 | 34.431±2.25 |
| 3 | 40.165±0.681 | 1.2±0.052 | 39.712±0.647 |
| 4 (центр) | 47.655±0.263 | 0.87±0.014 | 41.653±0.216 |
| 4 (периферия) | 31.268±1.216 | 1.424±0.131 | 39.233±1.214 |

Работа выполнена в рамках осуществления научно-исследовательского проекта под руководством ведущего ученого (№ 14.Z50.31.0004), поддержанного правительством РФ.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИФИЧНОСТИ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ВЫДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА БОЛЬНЫХ БРОНХОЛЕГОЧНЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И ХЕМОМЕТРИКИ

*Е.Б.Букреева¹, А.А.Буланова¹, Ю.В. Кистенев¹,
Д.А.Кузьмин¹, С.А.Тузиков², Е.Л.Юмов²*

¹СибГМУ Минздрава России,

²НИИ онкологии СО РАМН

E-mail: band107@mail.ru

Выдыхаемый воздух – это сложная многокомпонентная смесь, состав которой может изменяться, в том числе, вследствие газовой эмиссии биообъектов. Обычные методы решения обратной спектроскопической задачи эффективны только для небольшого числа компонент смеси, а также при их достаточно высокой концентрации. Поэтому чрезвычайно тяжело выделить из исходной газовой смеси единичные биомаркеры и подвергнуть их дальнейшему анализу. В работе рассмотрены подходы к оценке специфичности спектров, образованных большим числом молекул-биомаркеров эндогенного характера. Используемые методы хемометрики сегодня достаточно успешно применяются в мировых исследованиях, посвященных газоанализу выдыхаемого воздуха [1-3].

Дизайн исследования. В исследовании приняли участие 30 мужчин-добровольцев, которые сформировали 3 группы исследования с одинаковым количеством участников.

В группу А вошли больные с верифицированным диагнозом рака легкого. Различная локализация, различная степень развития патологического процесса и метастазирования. Все больные – пациенты торакоабдоминального отделения ФГБУ НИИ Онкологии СО РАМН (г. Томск). Численность – 10 человек. Средний возраст в группе А – 56,4 года. Половая принадлежность – мужчины. Критерии исключения: неверифицированный диагноз, прошедшее лечение (химиотерапия, радиотерапия, хирургическое лечение), тяжелое течение сопутствующих заболеваний.

В группу В вошли больные с верифицированным диагнозом хроническая обструктивная болезнь легких. Различная степень тяжести, фаза обострения. Все больные – пациенты пульмонологического отделения ОГАУЗ Городская клиническая больница №3 (г. Томск). Численность – 10 человек. Средний возраст в группе В – 53,1 года. Половая принадлежность – мужчины. Критерии исключения: неверифицированный диагноз, наличие бронхиальной астмы, пневмонии, тяжелое течение сопутствующих заболеваний.

В группу С вошли условно-здоровые молодые люди, некурящие. Критерии исключения: наличие острых заболеваний в течение 2 недель, предшествующих забору проб, наличие хронических заболеваний **бронхо-легочной**, сердечно-сосудистой, пищеварительной и мочеполовой систем, фактор курения в анамнезе. Численность – 10 человек. Средний возраст в группе С – 24,7 года. Половая принадлежность – мужчины.

Методика отбора проб. В исследовании отбирались пробы выдыхаемого воздуха. При помощи пластиковой трубочки воздух собирался в пробирку (объем 10 мл). Процедура состояла в следующем – испытуемый делал 3 выдоха через пластиковую трубочку и, после этого, пробирка закрывалась стерильным ватным тампоном. Все пробы отбирались до еды или через 1-2 часа после нее. Курящие испытуемые не курили до забора проб хотя бы в течение 30-40 минут. До взятия проб испытуемые полоскали ротовую полость проточной водой. От всех испытуемых была собрана необходимая информация. Добровольцы, вошедшие в группу С, заполняли анкету-опросник качества жизни SF-36, которая была необходима для оценки однородности этой группы.

Методика регистрации и обработки спектров. Все пробы были промаркированы и проанализированы с использованием лазерных оптико-акустических газоанализаторов ИЛРА-1 и ЛГА-2, разработанных фирмой ООО «Специальные технологии» (г. Новосибирск). Эти газоанализаторы собраны на базе волноводных, перестраиваемых по частоте CO₂-лазеров и резонансных оптико-акустических детекторов. Конструктивные особенности: ИЛРА-1 имеет внутрирезонаторное, ЛГА-2 – внерезонаторное расположение детекторов. Также есть отличия в элементной базе, самыми существенными из которых являются модификация лазерного источника и тип микрофонов, используемых в составе детекторов.

В результате проведенного газоанализа проб выдыхаемого воздуха были получены сканы спектров поглощения этих проб в диапазоне 9,2-10,8 мкм. Для каждого добровольца было зарегистрировано 10 сканов. Скан – полная запись спектра поглощения анализируемой пробы.

Для устранения экспериментальных данных с выбросами измерений использовалась методика, основанная на критерии Граббса, суть которого заключается в сравнении вычисленной статистики Граббса с неким ее критическим значением. В результате было отсеяно около 40 сканов измерений. Таким образом, на каждого участника исследования стало приходиться по 8 сканов спектров поглощения выдыхаемого воздуха.

Далее была проведена процедура интеркалибровки сканов, зарегистрированных на разных приборах. Суть процедуры заключается в пересчете коэффициентов поглощения с учетом спектров поглощения поверочной газовой смеси, зарегистрированных на каждом приборе, и теоретических спектров этой смеси, полученных из базы данных HITRAN. В качестве поверочной газовой смеси использовалась смесь с 5,1% концентрацией CO_2 в N_2 .

Для выбора наиболее информативных линий поглощения спектра использовался метод главных компонент (РСА-метод, от англ. «principal component analysis»). Для осуществления классификации был использован метод опорных векторов (SVM-метод, от англ. «support vector machine»).

Полученные результаты исследования. В исследовании приняло участие 3 группы (класса) добровольцев – больные раком легкого, хронической обструктивной болезнью легких и условно-здоровые добровольцы. 10 человек в каждой группе. После устранения экспериментальных данных с выбросами измерений на каждого добровольца стало приходиться 8 сканов (80 сканов для всей группы).

После этого осуществлялся выбор наиболее информативных линий поглощения спектра с точки зрения разделения групп исследования. Для этого использовалась программа ViDa Expert. Она вычисляет значения векторов главных компонент – матрицу счетов и матрицу нагрузок. В результате, исходя из анализа нагрузок главных компонент, из 37 линий поглощения было отобрано 29 наиболее значимых линий поглощения, 8 линий поглощения оказались малоинформативными.

Далее был применен SVM-метод для классификации добровольцев всех групп исследования по состоянию здоровья/заболеваемости. Было принято решение использовать в качестве единицы класса (группы) один скан спектра поглощения выдыхаемого воздуха. Таким образом, в классификации приняли участие 160 сканов добровольцев (80 сканов для каждой группы исследования). Классификация групп исследования была проведена по парам, в каждом случае была найдена чувствительность и специфичность SVM-метода. Результаты представлены ниже в таблице 1.

Таблица 1. Полученные результаты чувствительности и специфичности SVM-метода для попарной классификации всех групп исследования

| Попарная классификация | Чувствительность | Специфичность |
|------------------------|------------------|---------------|
| Группа А – Группа С | 100% | 55%-56,25%* |
| Группа В – Группа С | 100% | 100% |
| Группа А – Группа В | 100% | 100% |

* Результаты различаются в зависимости от функции ядра SVM-метода

Библиографический список

1. *Natale Corrado Di, Macagnano Antonella, et al.* Lung cancer identification by the analysis of breath by means of an array of non-selective gas sensors // *Biosensors and Bioelectronics*. 2003. V.18. P.1209-18.
2. *Phillips Michael, Altorki Nasser, et al.* Detection of lung cancer using weighted digital analysis of breath biomarkers // *Clinica Chimica Acta*. 2008. V.393 №2. P.76-84.
3. *Silvano Dragonieri, Robert Schot, et al.* An electronic nose in the discrimination of patients with asthma and controls // *J Allergy Clin Immunol*. 2007. V.120 №4. P.856-862.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ КЛЕТОК МЕРЦАТЕЛЬНОГО ЭПИТЕЛИЯ СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ ПОЛОСТИ НОСА

И.Ю.Ермаков¹, Г.О.Марева¹, Т.В.Данилова², А.О.Мантуров²

¹Саратовский государственный медицинский университет
им. В.И.Разумовского Минздрава России

²Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

E-mail: tvdan521@gmail.com

Основной функцией мерцательного эпителия слизистой оболочки полости носа является предохранение органов дыхания от внешних воздействий, в том числе и инфекций. Эпителий состоит из мерцательных клеток, имеющих многочисленные реснички длиной около 7 мкм. Строго направленное движение этих ресничек осуществляет транспортировку в определенном направлении микроскопических частиц, осаждающихся на поверхности слизистой оболочки из воздушной среды.

Описанный механизм повреждается при различных процессах, как острых, так и хронических. Известны также заболевания, сопровождающиеся врожденными дефектами реснитчатой системы эпителия человека. Таким образом, развитие методов наблюдения и исследование закономерностей функционирования мерцательного эпителия позволило бы увеличить эффективность диагностики и лечения лор-заболеваний.

Предложенные ранее методики микровидеоэндоскопии не получили широкого распространения, ввиду их сложности. Более простым методом исследования мерцательного эпителия является рассмотрение ресничек отдельных клеток, взятых при помощи браш-биопсии из полости носа или околоносовых пазух. Современный уровень развития техники позволяет под значи-

тельным увеличением производить высокоскоростную (до 50 кадров/сек) цифровую съемку, и анализировать полученные записи.

Нами был создан специальный комплекс, состоящий из лабораторного микроскопа «Zeiss» с тубусом для фотосъемки, камеры «Canon» D550 и персонального компьютера. Камера закреплена на тубусе при помощи оптического кольца-переходника и подсоединена к компьютеру. Для перемещения препарата использованы оптический стол и два шаговых мотора управляемых микроконтроллером Atmega 328. Настройка микровинта микроскопа осуществляется также при помощи шагового двигателя. После помещения препарата на столик и настройки макровинта все последующие действия выполняются описанным комплексом автоматически. Вид препарата выводится на экран монитора и сохраняется в файлах *.mov.

Для дальнейшей обработки полученных видеоданных было создано соответствующее программное обеспечение.

Программа разбивает видеоряд на последовательность кадров. Затем оператор выделяет на одном из кадров прямоугольную область интересную для исследования, и все части кадра, не вошедшие в данную область, отсекаются. Такое же отсечение, с аналогичными параметрами (размер и местоположение области исследования) повторяется для всех кадров последовательности. Следует отметить, что изучаемый препарат является жидкой средой, и, как следствие, существует вероятность перемещения области интереса во время видеозаписи. В этом случае, оператором указывается местоположение области исследования на первом и последнем кадрах, а промежуточные положения исследуемого участка определяются программой автоматически, исходя из предположения о прямолинейности и равномерности перемещения. На рисунке 1 показаны первый и последний кадры видеозаписи с выделенной областью исследования.

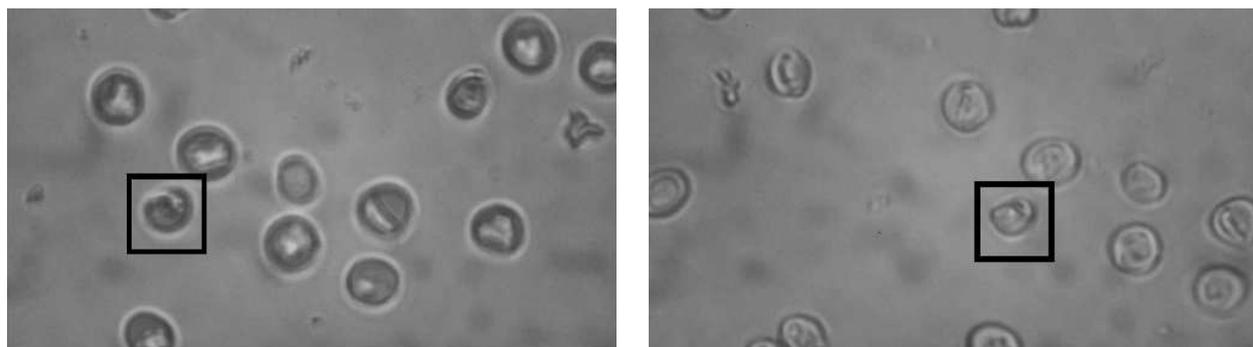


Рис. 1. Первый и последний кадры видеозаписи с выделенной областью исследования

Нами были получены и обработаны видеофайлы с размером кадра 1280x720 пикселей, частой видеопотока – 50 кадров в секунду, количеством градаций цвета равным 256, полутоновые.

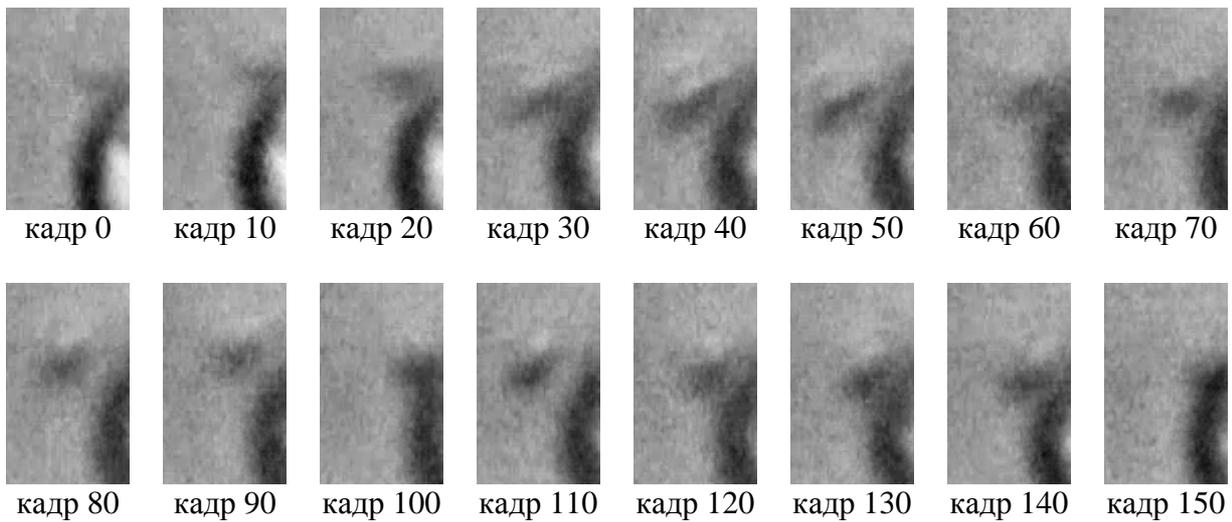


Рис. 2. Фрагменты кадров видеофайла

На рисунке 2 показаны выделенные из видеофайла области исследования, размером 61×101 пикселей, содержащие, предположительно, изображение реснички мерцательной клетки. В данном случае рассматривались 151 кадр видеофайла, что соответствует 3.02 секундам видеосъемки. Для демонстрации динамики изображения приведены с интервалом в 10 кадров, т.е. 0, 10, 20, 30, ... , 150 кадр.

Для получения более отчетливых контуров изображения могут быть обработаны согласно параметрам, заданным оператором [1].

На рисунке 3 показан результат поочередного применения к рассматриваемой последовательности функции увеличения контрастности, медианного фильтра 7×7 , функции уменьшения количества градаций цвета до пяти уровней, медианного фильтра 5×5 .

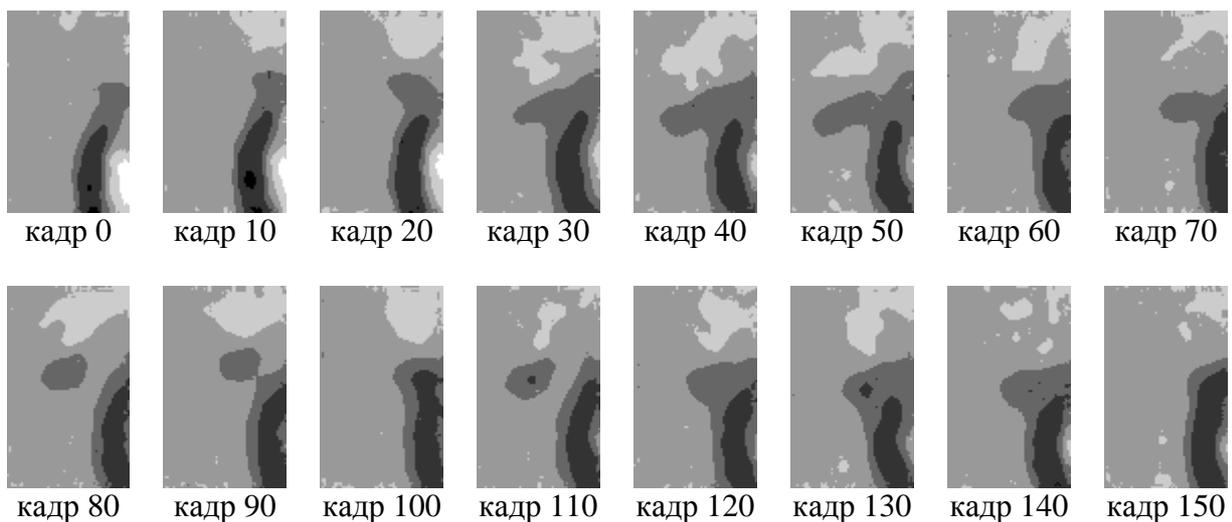


Рис. 3. Фрагменты кадров видеофайла после обработки

В настоящее время проводится работа по подбору оптимальных параметров обработки видеофайлов и автоматизации анализа получаемых изображений.

Библиографический список

1. *Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods* Digital Image Processing // Prentice Hall. 2008. P.954.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ФОРМЕ КОЛЕБАНИЙ ПЛЕЧЕВОЙ АРТЕРИИ С ПОМОЩЬЮ РАДИОВОЛНОВОГО АВТОДИНА

Д.А.Усанов, А.Э.Постельга, А.А.Дорошенко

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: usanovda@info.sgu.ru

При определении характеристик вибраций и перемещений оптически-ми и радиоволновыми методами используется явление интерференции, возникающее при сложении падающей и отраженной от объекта электромагнитных волн [1-3]. В таких измерителях в результате анализа временной зависимости интерференционного сигнала или его спектра можно с высокой точностью определить частоту и амплитуду механических движений объекта [4-9]. Такого рода системы могут быть использованы в медицине для мониторинга состояния пациентов [2]. В работе [10] исследовалась возможность восстановления формы пульсовой волны лучевой артерии в области запястья с использованием полупроводникового лазерного автодина. Однако использование данной методики затруднительно для определения формы пульсовой волны по колебаниям плечевой артерии ввиду их большой амплитуды, значительно превышающей длину волны лазерного излучения.

Для восстановления формы сложного непериодического движения отражателя использовалась методика, описанная в [11-12], которая ранее применялась для восстановления движения отражателя в системе с оптическим автодином. Данная методика основана на одновременном измерении интерференционного сигнала и его производной.

Пульсовая волна, возникающая в аорте в момент выталкивания крови из левого желудочка, распространяется по артериям. Колебания артерий вызывают периодические смещения тканей, в том числе в области плечевой артерии.

На рис. 1, 2 представлены синхронные записи ЭКГ сигнала со II стандартного отведения и автодинного сигнала, сделанные в состоянии покоя и после физической нагрузки.

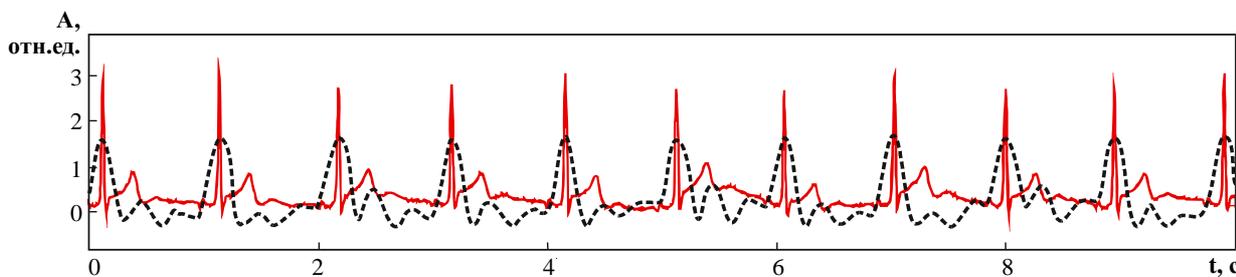


Рис. 1. Сравнение восстановленной функции движения стенки плечевой артерии (пунктирная линия) и II отведения ЭКГ (сплошная линия). Испытуемый в состоянии покоя.

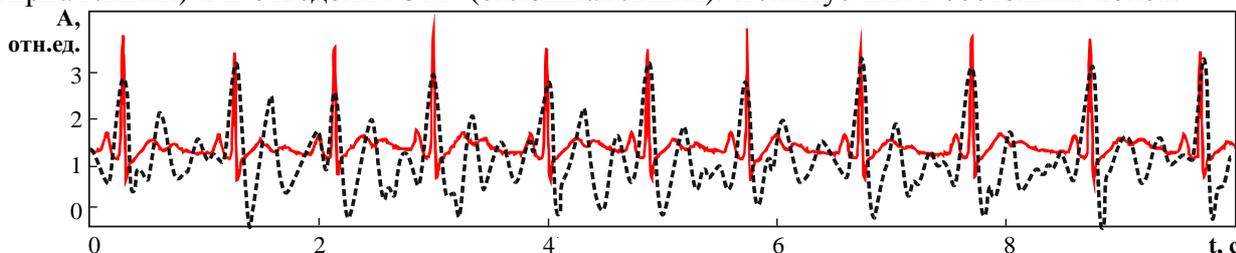


Рис. 2. Сравнение восстановленной функции движения стенки плечевой артерии (пунктирная линия) и II отведения ЭКГ (сплошная линия). Испытуемый после физической нагрузки.

В таблице 1 представлены соответствующие показатели variability сердечного ритма по Р.М. Баевскому, полученные с помощью СВЧ-автодина на диоде Ганна, и полученные с помощью электрокардиографа, а также относительные отклонения этих параметров. Таблица иллюстрирует соответствие результатов, полученных предложенным радиоволновым методом, с результатами, рассчитанными по ЭКГ.

Таблица 1 Показатели variability сердечного ритма по Р.М. Баевскому

| Индекс | Испытуемый №1 в состоянии покоя | | | Испытуемый №1 после нагрузки | | | Испытуемый №2 в состоянии покоя | | | Испытуемый №2 после нагрузки | | |
|--|---------------------------------|--------|---------------|------------------------------|--------|---------------|---------------------------------|-------|---------------|------------------------------|-------|---------------|
| | Восстановленный сигнал | ЭКГ | Отклонение, % | Восстановленный сигнал | ЭКГ | Отклонение, % | Восстановленный сигнал | ЭКГ | Отклонение, % | Восстановленный сигнал | ЭКГ | Отклонение, % |
| Mo, с Наиболее часто встречаемое значение кардиоинтервалов | 0,80 | 0,83 | 3,61 | 0,75 | 0,74 | 1,08 | 0,95 | 0,98 | 2,96 | 0,89 | 0,90 | 1,11 |
| AMo, % Доля кардиоинтервалов, соответствующих значению Mo, в % к объёму выборки | 40,00 | 37,30 | 7,24 | 47,60 | 45,90 | 3,70 | 44,30 | 44,70 | 0,89 | 17,60 | 17,50 | 0,57 |
| dX, с Разность между длительностью наибольшего и наименьшего кардиоинтервалов | 0,30 | 0,28 | 7,14 | 0,25 | 0,24 | 5,93 | 0,60 | 0,60 | 0,17 | 0,53 | 0,50 | 6,00 |
| ИН, у.е. Индекс напряжённости регуляторных систем | 83,30 | 80,30 | 3,74 | 126,90 | 133,00 | 4,59 | 38,90 | 38,00 | 2,37 | 18,40 | 19,40 | 5,15 |
| ИВР, у.е. Индекс вегетативного равновесия | 133,30 | 133,21 | 0,07 | 190,40 | 194,00 | 1,86 | 73,80 | 74,50 | 0,94 | 33,00 | 35,00 | 5,71 |
| ВПР, у.е. Вегетативный показатель ритма | 4,20 | 4,30 | 2,33 | 5,30 | 5,78 | 8,30 | 1,80 | 1,70 | 5,88 | 2,09 | 2,20 | 5,00 |
| ПАПР, у.е. Показатель адекватности процессов регуляции | 50,00 | 44,90 | 11,36 | 63,50 | 62,80 | 1,11 | 46,60 | 45,70 | 1,97 | 19,60 | 19,40 | 1,03 |

Сравнение приведенных зависимостей дает представление об эффективности вышеуказанной методики для определения формы пульсовой волны человека вследствие сердцебиения, а также общепринятых статистических параметров сердечной деятельности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. *Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.* Радиоволновые измерения параметров технологических процессов // М.: Энергоатомиздат. 1989. С. 208.
2. *Бугаев А.С., Васильев И.А, Ивашов С.И., и др.* Дистанционный контроль параметров кардиореспираторной системы человека с помощью радиолокационных средств // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. №10. С. 24–31.
3. *Hoglund R., Large P.* Технология безотражательных дальномеров для геодезистов и инженеров-строителей (перевод “Навгеоком”) // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2004. № 12. С. 15–19.
4. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С.* Измерение скорости нанометровых перемещений по спектру автодинного сигнала лазера на квантоворазмерных структурах // Письма в ЖТФ. 2004. №7. С.77-82.
5. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В.* Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме // Письма в ЖТФ. 2003. №9. С.51-57.
6. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Калинин М.Ю.* Восстановление формы сложного движения объекта по сигналу автодинного детектирования полупроводникового лазера // ЖТФ. 2000. Т.70. Вып.2. С.125-129.
7. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.* Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов // Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 2003. С. 312.
8. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э.* Сверхвысокочастотный автодинный измеритель параметров вибраций // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 1–5.
9. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., и соавт.* Радиоволновая интерферометрия движений тела человека, связанных с дыханием и сердцебиением // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. №11–12. С. 44–51.
10. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кащавцев Е.О.* Определение формы пульсовой волны по сигналу полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. 2013. №5. С. 82–87.
11. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Гангнус С. В.* Решение обратной задачи для восстановления параметров сложного периодического движения в лазерной гомодинной системе // Автометрия. 2001. № 1. С. 117-122.
12. *Гангнус С. В., Скрипаль А. В., Усанов Д. А.* Определение параметров движений объекта с помощью оптического гомодинного метода. // Автометрия. 1999. № 1. С. 31-37.

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ БЕЗОПАСНЫЕ УРОВНИ ЭНЕРГИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

П.Ю.Рогов, В.Г.Беспалов

Санкт-Петербургский, национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

E-mail: rogov1350@gmail.com

Благодаря своим особенностям фемтосекундное излучение может быть использовано для сверхточной обработки материалов, в медицинской технике, в телекоммуникационных системах и других отраслях человеческой деятельности. Благодаря своим свойствам оно, позволяет оказывать воздействие на прозрачные материалы, производя изменения структуры материала, внутри стекла или хрусталика человеческого глаза. Ультракороткие импульсы обладают высокой интенсивностью, и при этом обеспечивают минимально агрессивное воздействие на облучаемый объект. Это обусловлено длительностью импульса, время взаимодействия с веществом меньше чем минимальное время требуемого для взаимодействия с фононной подсистемой (3-10 пс), следовательно, не происходит нагрев материала. Другая важная особенность фемтосекундных импульсов связана с высокой интенсивностью что, в свою очередь, приводит к многочисленным нелинейным процессам, таким как: самофокусировка, генерация спектрального суперконтинуума, многофотонные эффекты и др.

Но, несмотря на перспективность исследований в данном направлении, развитие фемтосекундных технологий и их применение в биологии и медицине существует комплекс проблем, связанных с безопасностью эксплуатации фемтосекундных лазерных источников. В настоящее время не существует стандартов по безопасным уровням фемтосекундного лазерного излучения. Это касается в первую очередь особенностей воздействия излучения фемтосекундной длительности на клетки и ткани человека и взаимодействия с лазерными защитными материалами, связанных с наличием нелинейных эффектов из-за высокой мощности. Действующий ГОСТ Р 50723-94 «Лазерная безопасность» был принят в конце 1994 года и поэтому не содержит никаких упоминаний об излучении длительностью менее 100 пс. Таким образом, вопрос формирования требований к уровням энергии, средней мощности и плотности мощности в одиночном импульсе для фемтосекундного лазерного излучения требует подробного изучения.

Данная работа направлена на изучение влияния фемтосекундного лазерного излучения на биологические объекты (такие как кожа и глаза) и средства защиты (фильтры, защитные очки, материалы затворов), а также определение предельно допустимых уровней фемтосекундного лазерного излучения. Исходя из этого, был подготовлен план работ, включающий в себя следующие этапы:

1. Получение экспериментальных данных по взаимодействию биологических объектов, клеток и тканей человеческого организма с лазерным излучением фемтосекундной длительности; определение:

а) предельно допустимых уровней фемтосекундного лазерного излучения при однократном воздействии;

б) предельной однократной суточной дозы для всех типов соответствующих человеческих тканей (роговая оболочка глаза, кожа);

в) влияния длительности лазерного импульса и частоты повторения на пороговые значения воздействия по плотности энергии и мощности.

2. Экспериментальное определение значений допустимых пределов излучения и предельно допустимых уровней облучения, максимальной допустимой экспозиции, а также допустимых пределов плотности мощности для лазерных фемтосекундных систем.

3. Исследование воздействия на живые объекты сверхширокополосного излучения фемтосекундного спектрального суперконтинуума.

4. Исследование воздействия фемтосекундного лазерного излучения на технические средства защиты.

5. Создание базы данных для внесения дополнений и поправок в существующий ГОСТ Р 50723-94 «Лазерная безопасность».

В докладе будут представлены данные, полученные в ходе аналогичной программы исследований FST Germany.

Библиографический список

1. С.А. Ахманов, В.А. Выслоух, А.С. Чиркин. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов // М.:Наука. 1988. С.310.
2. С. Rulliere. Femtosecond laser pulses // Springer, Ed. Rulliere C. 2005. P.438.
3. А.М. Желтиков. Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики. // М.:Физматлит, 2006. С.296.
4. С.А. Козлов, В.В. Самарцев. Оптика фемтосекундных лазеров // М.: Физматлит, 2009. С.292.
5. В. Г. Беспалов, С. А. Козлов, В. Н. Крылов, С. Э. Путилин. Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии: Учебное пособие // СПб.: СПбГУ ИТМО. 2010. С234.
6. ГОСТ Р 50723-94: Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. // М.: Издательство стандартов, 1995. С.34.
7. А. Hertwig, S. Martin, J Krueger, C. Spielmann, M. Lenner, W. Kautek. Primary Hazards and Reliability of Protective Materials // In: Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications - Springer Berlin Heidelberg. 2004. P. 287-308.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ПАССИВНЫМИ МЕТКАМИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР В ИНВАЗИВНОЙ БИОСЕНСОРИКЕ

*С.В.Агасиева¹, А.Г.Гудков¹, Ю.А.Иванов², С.А.Мешков¹, В.Ю.Синякин¹,
В.Д.Шашурин²*

¹ООО "НПИ ФИРМА "ГИПЕРИОН", Москва,

²МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва

E-mail: s.agasieva@mail.ru

Анализ показал перспективность технологии радиосвязи для считывания данных инвазивных биосенсоров и, в частности, технологии РЧИД с пассивными метками. Данная технология не только обеспечивает двустороннюю связь импланта с внешним считывающим устройством, но и позволяет решить проблему питания биосенсора.

Исследование проблем выбора рабочего диапазона частот, мощности считывателя и чувствительности метки показало необходимость совместного их решения. Наиболее подходящими являются диапазоны ВЧ и УВЧ, причем последний является более перспективным с точки зрения развития биосенсорных систем.

Проведено теоретическое исследование проблемы повышения чувствительности и радиуса действия пассивной метки РЧИД УВЧ диапазона. Показано, что на чувствительность и радиус действия влияют как характеристики антенны метки, так и параметры схемы питания.

Применяя РТД взамен ДБШ в выпрямителе метки биосенсора при прочих равных условиях, можно снизить мощность считывающего устройства до 7 раз, тем самым уменьшив вредное влияние электромагнитного излучения на пациента и медицинский персонал. При заданной мощности считывателя данное решение позволит уменьшить габариты биосенсора за счет сокращения размеров антенны до 2-х раз, что важно для инвазивных биосенсоров. Кроме того, облегчается решение проблемы электромагнитной совместимости приборов и оборудования в медицинском учреждении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-12035 офи_м.

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЕ РЕДКИХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ЗАБОЛЕВАНИЙ В МАЗКЕ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ

Э. Б.Александрова

Институт Медико-биологических проблем РАН, г. Москва

E-mail: elona6@yandex.ru

Актуальность проблемы:

Применение световой микроскопии в биологии и медицине имеет сравнительно короткую историю. Первые работы появились в конце 60—70-х годов. С этого времени количество работ стремительно увеличивается и полученные при помощи этого метода данные внесли существенный вклад в развитие новых представлений о строении клеток, органов и тканей. Благодаря разработкам методов подготовки биологических объектов, этот метод находит все более широкое применение при изучении проблем клеточной патологии.

При неблагоприятных экологических условиях клетки красной крови подвержены значительному гемолизу. Как правило гемолиз наблюдается после набухания эритроцитов дискоцитов, реже эхиноцитов. Микровезикулы при гемолизе представлены диаметром 0,1 - 0,2 мкм или игловидными выростами - спикулами, имеющими диаметр примерно от 0,1 мкм до 0,4 мкм. Тени эритроцитов человека имеют в некоторых случаях дефекты мембраны размером до 0,8 мкм. Морфологическая картина представлена набуханием эритроцитов, а также гемолизом дискоцитов и трансформацией его в эхиноциты и стоматоциты с последующим выходом гемоглобина. Основные патологические формы эритроцитов это эхиноциты, стоматоциты, микроциты, акантоциты.

Данные об изменении форм эритроцитов имеют важное значение для диагностики. Состояние поверхности клеток крови ответственно за разворачивание ряда явлений, происходящих в организме как в норме, так и при патологических состояниях (общая морфологическая структура гомеостаза, диapedез клеток, различные иммунологические реакции). Важность методических аспектов в световой микроскопии определяется динамичностью клеточных мембран и реактивностью поверхностных морфологических образований к внешним воздействиям.

Принято считать, что одним из морфологических признаков ряда наследственных заболеваний - являются акантоциты (эритроциты с многочисленными беспорядочными выростами цитоплазмы). Акантоцит - это особенная форма эритроцита при наследственном отсутствии (3-липопротеина). Клетка имеет редко расположенные хаотичные выросты с шишечкой на конце. Это необратимая форма, так как связана не с патологией плазмы крови, а с патологией самой клетки. Изменение формы эритроцитов — энергетически-зависимый процесс. Угнетение метаболизма клетки, в частности уменьшение концентрации АТФ, вызывает повышение чувствительности эритроцитов к трансформирующим агентам. Так, например, альбумины способст-

вуют стоматоцитарной трансформации, а гамма-глобулины — эхиноцитарной. Нагрузка Са вызывает полиморфные изменения, как мембран, так и субмембранных структур.

Несмотря на то, что акантоциты встречаются редко, и часто остаются не выявленными, в отдельных случаях их своевременная диагностика может иметь важное клиническое значение.

Цель исследования: разработка метода выявления редких морфологических признаков заболеваний в мазке периферической крови.

Разработанный метод может быть использован для более точного выявления и подтверждения наличия в мазке периферической крови: морфологических аномалий эритроцитов, тромбоцитов и лейкоцитов.

Суть метода: метод фотомикроскопии основан на микроскопическом исследовании окрашенных мазков периферической крови при $\times 1000$ кратном увеличении микроскопа, с последующим фотографированием выявленных морфологических изменений. Предлагаемый метод можно использовать на всех микроскопах, в которых предусмотрена возможность фотографирования исследуемого мазка.

Заключение и выводы:

При использовании данного метода было установлено, что при микроскопическом исследовании мазков периферической крови акантоциты выявляются при $\times 1000$ кратном увеличении микроскопа. При просмотре мазка крови того же человека при $\times 700$ кратном увеличении акантоциты не обнаруживаются.

Предлагаемый метод может быть использован, для выявления в мазке периферической крови наследственных признаков заболеваний.

Кроме того, наличие акантоцитов может являться важным диагностическим признаком повреждения мембранных липидов.

В настоящее время разработанная мной фотомикроскопическая методика выявления редких морфологических аномалий, эритроцитов используется в диссертационном исследовании по теме «Влияние СВЧ-излучения различной интенсивности на взаимоотношения показателей перекисного окисления липидов и антиоксидантной системы организма».

Библиографический список

1. Бархина Т.Г., Никитина Г.М., Черных А.С. Экологическая морфология клеток периферической крови в норме и патологии // Успехи современного естествознания. – 2006. № 1 С. 35-36
2. Атлас клеток крови и костного мозга (под ред. Г. И. Козинца). // М.: «Триада-Х». 1998. С.160.
3. Введение в биомембранологию // Под ред. А. А. Бондарева. М.: Изд-во МГУ. 1990. С.208 .
4. Козинец Г., Симоварт Ю. Поверхностная архитектура клеток периферической крови. — Таллин: Валгус. 1984. С.116.
5. Козинец Г. И., Высокский В. В., Погорелое В. В. Кровь и инфекция. М.: Триада-фарм, 2001. С.456.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОБСТВЕННЫХ РАДИОТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ С 3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ

А.Г.Гудков¹, В.Ю.Леушин², И.А.Сидоров³

¹ МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва,

² ООО "НПИ ФИРМА "ГИПЕРИОН", Москва,

³ ОАО "Концерн "Вега", Москва

E-mail: s.agasieva@mail.ru

Любые физические тела, в том числе биологические объекты, излучают в окружающее пространство электромагнитные поля в широком диапазоне частот. Исследование характеристик этих полей позволяет получить информацию об объекте, в частности информацию о состоянии глубинных структур излучающих тел. Применение различных физиологических тестов изменяет структуру полей излучения биологических объектов и, соответственно, позволяет получить информацию о возможных патологических изменениях неинвазивно, то есть без проникновения внутрь объекта.

Актуальность проведения исследования обусловлена возможностью выявления методами радиотермографии злокачественных новообразований и сосудистых патологий на ранней стадии развития. В данной работе исследуются способы повышения разрешающей способности определения температурных аномалий на основе применения антенных решеток и принципа многоканальности. Для получения 3D-изображений радиотепловых полей собственного излучения биологических объектов предлагается использовать результаты измерений на различных частотах в микроволновом диапазоне длин волн.

Полученные результаты будут являться основой для создания современных неинвазивных диагностических приборов, использующих принципы радиотермографии. Предлагаемый метод не имеет аналогов в мировой практике и является принципиально новым.

ИНСТРУМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ПРОФИЛИРОВАННОГО САПФИРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРАПИИ ОПУХОЛЕЙ

И.А.Шкунова, В.Н.Курлов, В.Б.Лощенов¹

Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН),
Черноголовка

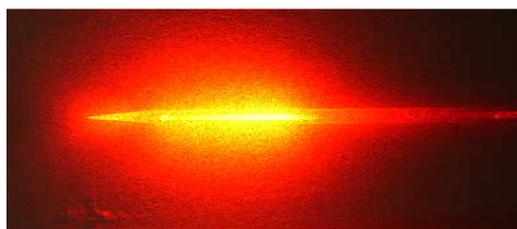
¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
(ИФТТ РАН), Москва

E-mail: sh_irina@issp.ac.ru

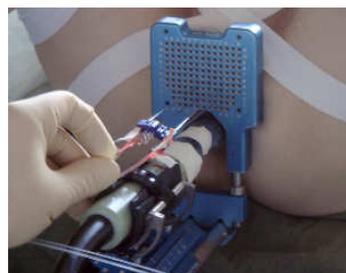
Институт физики твердого тела РАН совместно с Институтом общей физики им. А.М. Прохорова РАН разрабатывают новый класс медицинских лазерно-волоконных приборов и инструментов с применением сапфировых оптических элементов уникальных форм. Авторами разработана оригинальная методика получения кристаллов сапфира требуемого профиля, которая, в том числе, позволяет получать тонкие капиллярные каналы диаметром менее 600 мкм в объеме кристаллов сапфира; каналы используются для размещения кварцевых волокон для облучения и захвата оптического излучения для экспресс анализа состояния биоткани.

Сапфировые игловые капилляры используются как главный элемент лазерных световодных облучателей при лечении интерстициально опухолей для целого ряда локализаций (печени, простаты, щитовидной железы и др.) методами фотодинамической терапии, гипертермии, коагуляции, рис.1.

Для облучения подкожных и глубоколежащих образований требуются особые световоды, способные при общем нагреве выдерживать длительный контакт со средой организма и продуктами фототермического разложения без изменения качества и геометрии пучка [1].



а



б

Рис.1 Сапфировая игла для внутритканевого облучения простаты (а); фотодинамическая терапия простаты облучателями с сапфировыми иглами на позиционирующем оборудовании для брахитерапии, МНИОИ им. П.А. Герцена (б)

Разработаны новые световоды внутритканевой доставки непрерывного лазерного излучения, основанные на тонких кварцевых световодах, помещенных в сапфировые игловые капилляры [2]. Возможность формирования различной геометрии торца иглы и очень малого радиуса закругления сапфирового острия (до 25 нм) позволяет формировать необходимые световые поля для разных задач и типов ткани (печень, простата и т.д.). Получены открытые и закрытые оптические сапфировые иглы ($d_{\text{вн}}=1,2\text{мм}$, $d_{\text{кан}}=0,5\text{мм}$), которые

имеют высокую прочность, могут вводиться самостоятельно и допускают любые способы стерилизации без ухудшения геометрии острия, дают возможность проведения разных типов воздействия и адаптированы к стандартному набору инструментов.

Инструменты для тотального удаления опухолей под контролем флуоресцентной диагностики.

По авторской методике выращены кристаллы с несколькими каналами, часть из которых используется для размещения волокон спектрометрической системы. Это позволяет одновременно с воздействием проводить флуоресцентную диагностику состояния ткани в окрестности рабочего конца инструмента. Помимо диагностики злокачественности клеток есть возможность использовать фотохимический, гипертермический, вторичный электромагнитный и другие эффекты для деструкции раковых клеток.

Так, разработан скальпель с сапфировым лезвием с оригинальным размещением рабочих концов волокон в теле лезвия вблизи режущей кромки с возможностью концентрации излучения для коагуляции сосудов, а также захвата оптического сигнала от клеток резецируемой ткани [3]. Последнее позволяет хирургу отличать раковую ткань от нормальной непосредственно в процессе операции. Точность позволяет диагностировать злокачественные изменения порядка толщины клеточного слоя.

Для хирургии опухолей головного мозга разработан сапфировый многоканальный коагулятор-аспиратор с одновременной флуоресцентной диагностикой.

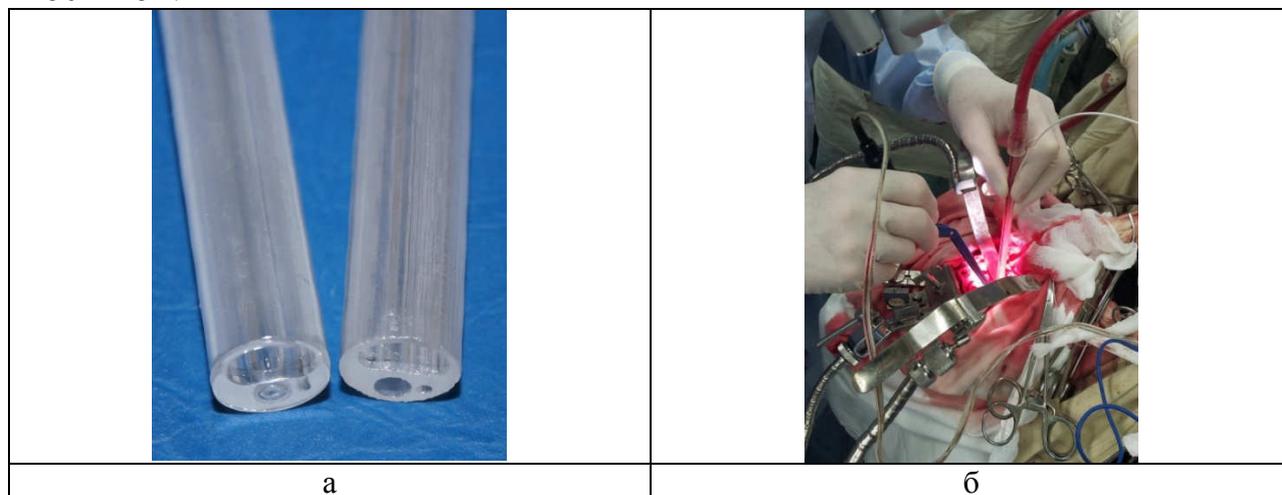


Рис.2 Сапфировый зонд коагулятора-аспиратора (а), удаление опухоли с флуоресцентной диагностикой, МОНИКИ им. М.Ф.Владимирского (б)

Система на основе сапфирового зонда проводит одновременную лазерную коагуляцию для гемостаза, аспирацию опухоли через сквозной канал сапфирового зонда, а также производит локальные оптические измерения свойств мозговой ткани для более точного и полного удаления опухолевой ткани [4], рис.2. Количественно оценивается концентрация флуорофора в непрерывном режиме, даже в случае отсутствия прямой видимости или при погруженном зонде.

Преимуществами инструментов на основе оптического профилированного сапфира являются: объединение функций нескольких необходимых для проведения операции устройств с количественными оптическими он-лайн измерениями непосредственно по месту оперирования, в том числе интерстициально; высокая надежность, уменьшение травматичности операции и кровопотери, сокращение времени оперативного вмешательства за счет одновременного выполнения удаления, демаркации опухоли и остановки кровотечения. Применение инструментов позволит повысить радикальность противоопухолевой терапии, что увеличивает продолжительность жизни пациента после операции.

Библиографический список

1. *Bown S.G.* Phototherapy of Tumors // World J Surg. 1983. V. 7. P.700-709.
2. *Kurlov, V.N., Shikunova, I.A., Ryabova, A.V., Loschenov V.B.* Sapphire Smart Scalpel // AIP. Laser Florence 2009. 2010. V. 1226. P. 76-78.
3. *Волков В.В., Лощёнов В.Б., Шикунова И. А., Курлов В. Н.* Сапфировые интродьюсеры для лазерной внутритканевой фото- и термодеструкции // Российский химический журнал. 2013. № 5. С. 48-55.
4. *Киселев А.М., Есин И.В., Шикунова И.А., Курлов В.Н., Терещенко С.Г., Лапаева Л.Г.* Комбинированная нейронавигация в хирургии злокачественных опухолей головного мозга // Альманах клинической медицины. 2011. № 25. С. 58 – 63.

УВЕЛИЧЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ОРГАНОМИНЕРАЛОВ ИЗ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА IN VITRO В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ МОЧЕВИНЫ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННЫХ ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А.Д. Усанов, В.Г. Ребров, Д.Г. Верхов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: aka_norton@mail.ru

В настоящее время для современной урологии представляет интерес проведение экспериментальных исследований, связанных с поиском новых терапевтических методов лечения мочекаменной болезни человека. В качестве эффективного растворителя, влияющего на растворение мочекаменных образований можно использовать мочевины, растворенную в воде, так как ее водные растворы уже являются хорошими растворителями веществ [1]. Ранее в работе [2] экспериментально была установлена степень влияния водного раствора мочевины, обработанного переменным магнитным полем (ПМП) частотой 2 Гц, в присутствии минерала на процесс его растворения в условиях *in vitro*. Полученные результаты показали, что максимальный отклик системы на воздействие переменного магнитного поля при растворении органо-минерала в водных растворах мочевины, находящихся непосредственно в действующем ПМП, проявлялся только на 4-й час опыта и был на 31,15% выше, чем в контроле (без воздействия ПМП). Однако не было известно, в

какой степени смогут проявиться растворяющие свойства водных растворов мочевины, если их предварительно подвергнуть облучению ПМП при той же частоте магнитного поля в течение часа, а затем полученный таким образом растворитель использовать для многократного растворения органоминералов.

В связи с этим целью исследования являлось установить степень влияния мочевины в составе водного раствора, предварительно обработанного ПМП частотой 2 Гц, на многократный процесс растворения органоминералов человека во времени *in vitro*.

Для этого во всех экспериментах (контрольных и опытных) использовались образцы органоминералов (оксалатного типа) от одного донора и мочевины ЧДА ГОСТ 6691-71. Водные растворы мочевины готовились с концентрацией 10,36 г на 100 мл воды, так как данное значение концентрации мочевины, выбранное нами для исследований, соответствует величинам, используемым при исследованиях *in vivo* (0,4 – 30 г на 100 мл воды) [3]. Отобранные для опыта шесть исходно целых образцов мочевых камней взвешивались на аналитических весах фирмы OHAUS Corp. RV214 с точностью 0,0001 г. Исходный вес органоминералов в контроле составлял 0,0266 г, 0,0275 г, 0,0258 г, а в опыте 0,0236 г, 0,0241 г, 0,0229 г. Приготовленные растворы мочевины, используемые в опыте, последовательно обрабатывались магнитным полем частотой 2 Гц с индукцией 50 мТл с интервалом по 60 минут в течение 4 часов. Экспериментальная установка по воздействию ПМП на исследуемые растворы описана нами ранее в работе [4]. Контрольные растворы с той же концентрацией мочевины находились в той же лаборатории при фоновых уровнях магнитного поля, характерных для места проведения опытов.

В первой части опытов растворимость органоминералов определяли по выходу в раствор органической составляющей мочевых камней спектрофотометрическим методом. Растворимость минералов определяли в течение 4-х часов, где после каждого часа проводили фотометрирование растворов. В дальнейших исследованиях использовали полученные суспензии, последовательно их суммируя, после чего их также фотометрировали. Регистрацию спектров проводили на спектрофотометре Shimadzu UV-1700 (Япония) при комнатной температуре в кварцевых кюветах размером 1×1×4,5 см. Спектры анализировали в максимумах поглощения матричных белков мочевых камней при длине волны 291,5 нм [5]. Для объективной оценки растворенной части органоминералов в растворах мочевины, обработанных ПМП, относительно контрольных растворов был проведен весовой метод по остаточному весу контрольных и опытных образцов. Нерастворенную часть минералов промывали дистиллированной водой, а затем обсушивали на фильтре под струей горячего воздуха. Окончательную дегидратацию мочевых камней проводили в СВЧ-поле с использованием генератора типа Г4-141, после чего проводили взвешивание на аналитических весах.

Для определения оптической плотности (D) растворов мочевины с растворенной в них частью органоминералов была проведена серия эксперимен-

тов из трех независимых опытов. На рис. 1 представлены средние арифметические значения величин оптической плотности растворов мочевины с растворенной частью образцов на каждый час растворения.

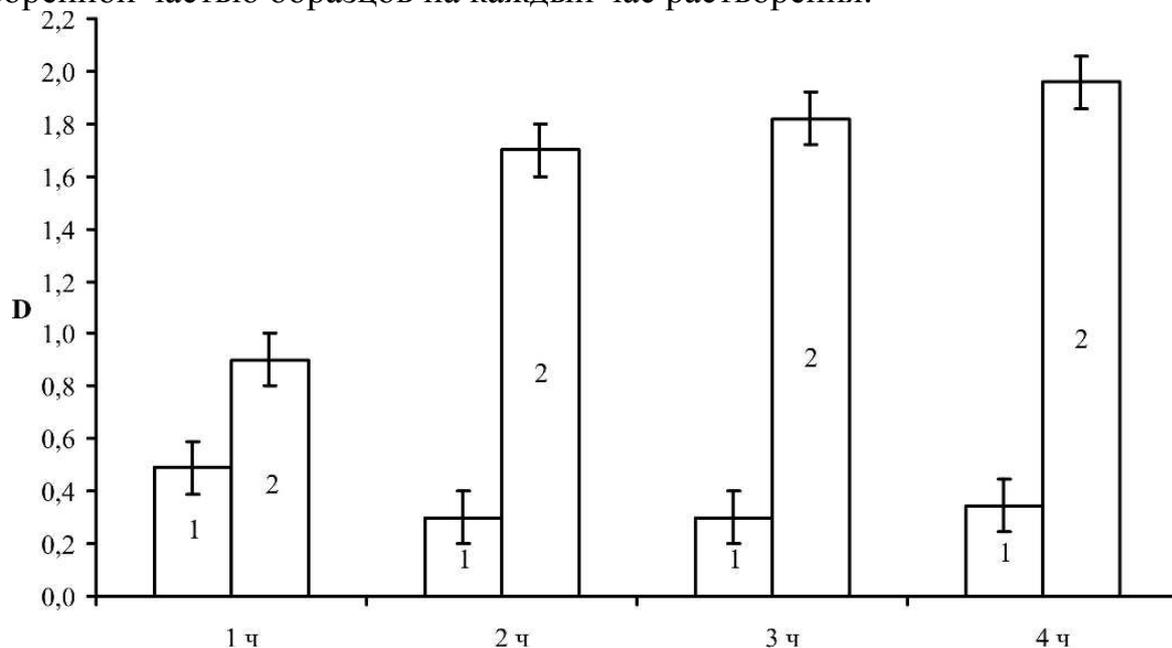


Рис. 1. Зависимость величины оптической плотности растворов мочевины на каждый час растворения: 1 – водный раствор мочевины с камнем без воздействия ПМП; 2 – водный раствор мочевины после воздействия ПМП частотой 2 Гц

Из результатов, представленных на рис. 1, видно, что величина оптической плотности для растворов мочевины, обработанных магнитным полем, значительно выше, чем в обычных растворах мочевины уже ко 2-му часу опытов. Наблюдаемая тенденция к увеличению этого параметра сохраняется в течение всего эксперимента, последовательно увеличиваясь с каждым часом опыта.

Также проводилось исследование непрерывного процесса растворения мочевого камня в течение всего 4-х часового эксперимента. Для этого во второй части опытов исследования проводились с суспензиями, полученными в первой серии опытов, в составе которых была растворенная часть органоминералов за каждый час растворения. Их готовили, последовательно суммируя почасовые растворы. В результате полученные составы также фотометрировали при той же длине волны. На основании результатов, полученных в данной серии, построены зависимости величины оптической плотности суммарных суспензий от времени растворения минералов, которые представлены на рис. 2.

Как видно из приведенных на рис. 2 зависимостей, различие в оптической плотности для опытных и контрольных растворов мочевины с растворенной частью органоминерала с течением времени становилось все более выраженным. Увеличение данного различия можно объяснить влиянием омагниченного раствора мочевины как химического модификатора водных растворов при длительном процессе растворения мочевого камня. Для определения количества растворенного вещества органоминералов был проведен

весовой метод, результаты которого получены после окончания эксперимента по остаточному весу образцов. Разница в весе растворенной части мочевых камней после их растворения в контрольных и опытных растворах мочевины составила в среднем соответственно 0,001 г и 0,0046 г, что соответствует лишь 3,7 % минерала в контрольных растворах. Для опытных растворов эта величина составила 19,5 %.

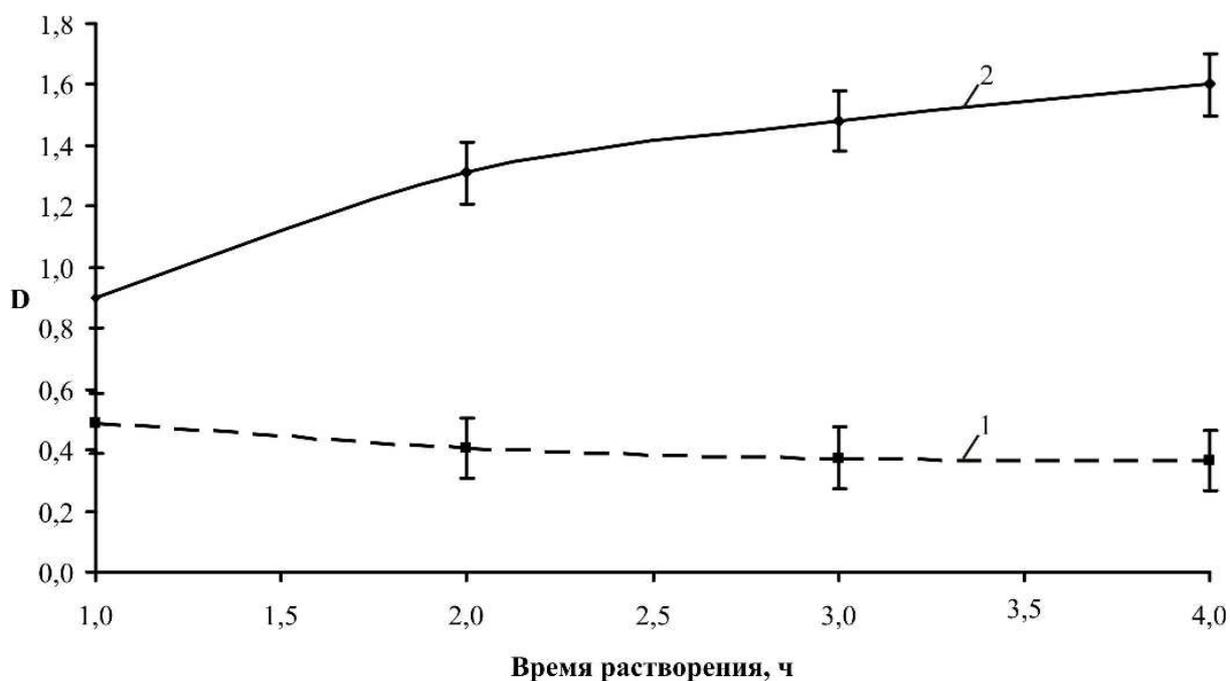


Рис. 2. Зависимости величины оптической плотности суммарных суспензий от времени растворения органоминералов в водных растворах мочевины: кривая 1 – для контрольных суммарных суспензий; кривая 2 – для суспензий, полученных из почасовых растворов, подвергавшихся воздействию ПМП

Результаты проведенных исследований свидетельствуют об эффективности применения растворов мочевины, предварительно обработанных в течение часа ПМП частотой 2 Гц, в процессе растворения мочевых камней из организма человека. Увеличение растворимости органоминералов наблюдалось уже после часовой обработки ПМП раствора мочевины с последующим помещением в него мочевого камня, и этот процесс развивался во времени с нарастанием растворимости органоминерала в течение всего эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. Зотов А.Т. Мочевина // М.: Государственное науч.-техн. изд-во хим. литературы. 1963. С.173.
2. Попков В.М., Усанов Д.А., Усанов А.Д., Ребров В.Г., Верхов Д.Г. Влияние переменного магнитного поля на растворимость органоминералов человека в водных растворах мочевины in vitro // Экспериментальная и клиническая урология. 2013. №3. С. 18-20.

3. Cook W.H., Alsberg C.L. Preparation of Glutenin in Urea Solutions // Canadian Journal of Reserch. 1931. Vol. 5. №3. P. 355-374.
4. Устройство для воздействия магнитным полем на биообъекты: пат. 70138 Российская Федерация / Усанов Д.А., Сучков С.Г., Сергеев А.А., Усанов А.Д., Сучков Д.С., Селифонов А.В.; заявитель и патентообладатель Сарат. гос. ун-т. - № 2007137167/22; заявл. 08.10.2007; опубл. 20.01.2008.
5. Демченко А.П. Ультрафиолетовая спектрофотометрия и структура белков.– Киев: Наук. думка. 1981. С.208.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕМЕНЕННОСТИ ПИЩЕВОЙ И ФАРМ-ПРОДУКЦИИ

В.А. Иванов, Д.С. Сидоренко¹

Санкт-Петербургский Электротехнический Университет (ЛЭТИ),

¹ ООО «Синергис», Санкт-Петербург

E-mail: microwavesbrain@gmail.com

В докладе рассматривается комплекс вопросов, возникающих при использовании микроволновой энергии для снижения микробиологической обсемененности продуктов различной природы. В исследованиях использовались как сухие субстанции: специи, лекарственные травы, так и высоко влажные – имитированная икра. Прежде всего, проанализированы возможные механизмы взаимодействия микробов с микроволновым полем. Здесь акцент сделан на селективность воздействия на различные типы бактерий, на скорость роста и снижения температуры, воздействие дополнительных физических факторов.

В работе рассматриваются опыт проектирования и изготовления микроволновых установок мощностью 10-15кВт, использующих многогенераторную схему построения. Представлены характеристики установок непрерывного - «МаБаТерм» и циклического действия - «Родник» и «МИкра». В последних двух типах используется обработка продуктов в таре.

Использование автоматизированного управления – неотъемлемый фактор эффективности технологического процесса. Конкретная реализация осуществлена на ПЛК и сенсорных экранах фирмы Митсубиши.

В докладе представлен большой объем экспериментальных данных, полученных в производственных условиях для номенклатуры продуктов, насчитывающих 20 наименований. Контроль температуры проводился с использованием автономных терморегистраторов, помещаемых непосредственно в продукт. Показана возможность уменьшения числа бактерий на 2-3 порядка в сравнении с исходным уровнем без ухудшения органолептических параметров. Представлен прогноз использования данной технологии в промышленности.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЭКСПРЕСС РЕГИСТРАЦИИ ПОГЛОЩАЮЩИХ И РАССЕИВАЮЩИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

А.Ю. Потлов, С.Г. Проскурин, С.В. Фролов
Тамбовский государственный технический университет
E-mail: zerner@yandex.ru

Закономерности, полученные в результате анализа поведения нормированного максимума фотонной плотности, позволяют более детально объяснить процесс диффузии фотонов в биологической ткани и по новому взглянуть на подходы к детектированию неоднородностей в диффузионной оптической томографии (ДОТ) и к аналитическому решению уравнения переноса излучения [1-2].

В частности в связи с высокими требованиями к производительности вычислений и значительной длительностью восстановления томографических изображений, путём вычисления пространственных распределений значений оптических параметров исследуемого объекта из временных функций рассеяния точки (ВФРТ), т.е. решения обратной задачи ДОТ, в данной работе предлагается обратить внимание на возможность прямой регистрации неоднородностей [1,3-4].

Одним из способов такой регистрации является визуализация совокупности ВФРТ в декартовой системе координат в виде трехмерной поверхности. При этом однородный случай будет представлять собой седловую функцию, плавно переходящую в плоскость (рис. 1а), а неоднородный – аналогичную поверхность (рис. 1б), но с провалом, в той её части, которая соответствует ВФРТ, полученным с наиболее близких к неоднородности детекторов [3-4].

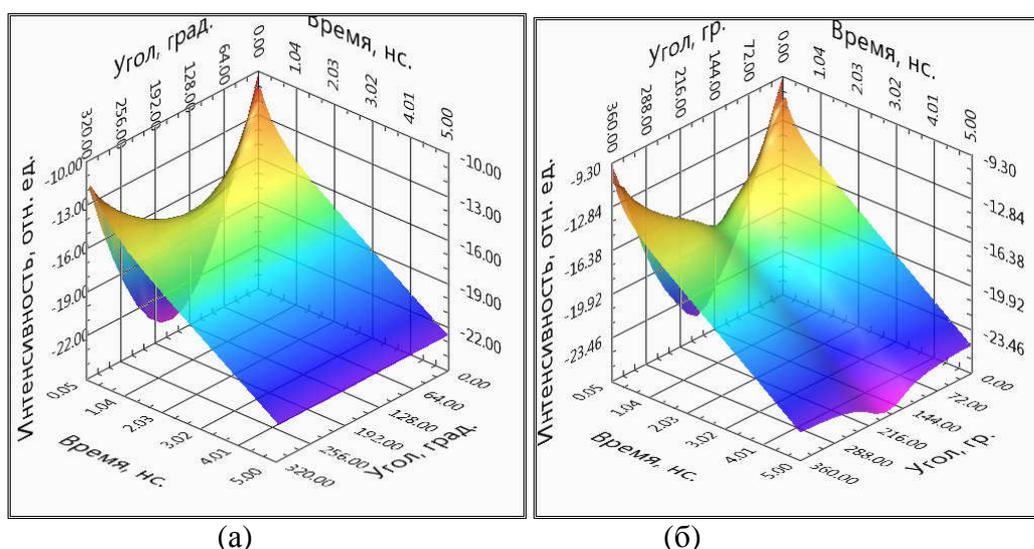


Рис. 1. Трехмерное представление временных зависимостей ВФРТ в декартовой системе координат для однородного (а) и неоднородного (б) случаев

Такой способ отличается простотой (режим реального времени) и надёжностью, однако на данном этапе применим лишь к сравнительно большим неоднородностям (в рассмотренном примере неоднородность имела около 20 мм в диаметре). Это в целом соответствует многим клиническим случаям, т.к. реальной опухоли размером в несколько миллиметров, соответствует область ангиогенеза (паталогического образования новых кровеносных сосудов) размером в несколько сантиметров. Поскольку показатель поглощения крови и опухоли существенно выше, чем у здоровых тканей, для ДОТ системы они будут представлять собой единую сравнительно большую паталогическую неоднородность [1].

Для повышения точности прямого детектирования неоднородностей предлагается способ трехмерного представления конформно-отображённых ВФРТ в цилиндрической системе координат [1]. Способ включает в себя следующие действия: поздно пришедшие фотоны (ППФ) каждой ВФРТ нормируются относительно ППФ ВФРТ для минимального угла; получившаяся нормированная функция аппроксимируются прямыми линиями; на основе ППФ ВФРТ для минимального угла строится эталонная функция; нормированная функция видоизменяется (усиление, ослабление искривления) с учетом дополнительного коэффициента отображения; далее производится переход из декартовых координат к цилиндрическим и получившиеся функции визуализируются.

Этот способ был реализован в виде специализированного программного продукта в среде LabVIEW. Результаты его работы для однородного и неоднородного случаев показаны на рис. 2а и 2б, соответственно. Поверхности построены из тех же теоретических ВФРТ, что были использованы для рис. 1а и 1б. При таком представлении ВФРТ в однородном случае расстояние от образующих цилиндрической поверхности до её направляющей (оси цилиндра) сохраняется одинаковым. Любые отклонения от этого расстояния (единичный радиус) характерны только для неоднородных случаев. Причем из-за использования цилиндрической системы координат неоднородный случай не просто отличается от однородного, но и заметен угол к оси падающего излучения, под которым находится ближайший к неоднородности детектор, а значит применительно к сферическим и цилиндрическим объектам очевидным является примерное местоположение неоднородности. Тот факт, что искривление затронуло сразу несколько соседних ВФРТ (находящихся под углами 36°), косвенно свидетельствует о размере и примерной глубине залегания неоднородности.

Предложенный способ может быть использован во время-разрешённой ДОТ для экспресс детектирования гематом, опухолей, кист и т.п. при диагностике структур головного мозга (и, как вариант, в другом перспективном направлении использования ДОТ – маммографических исследованиях). В связи с тем, что конформное отображение ППФ ВФРТ в цилиндрической системе координат не требует высокопроизводительных вычислений, с его помощью можно в режиме реального времени зарегистрировать патологию в исследуемом биообъекте, и лишь потом, если она есть, восстановить изображение

существующими способами или прибегнуть к другому методу диагностики. Этот способ может быть программно реализован для того же аппаратного обеспечения, что и способы решения обратной задачи, т.е. его реализация не требует дополнительных затрат.

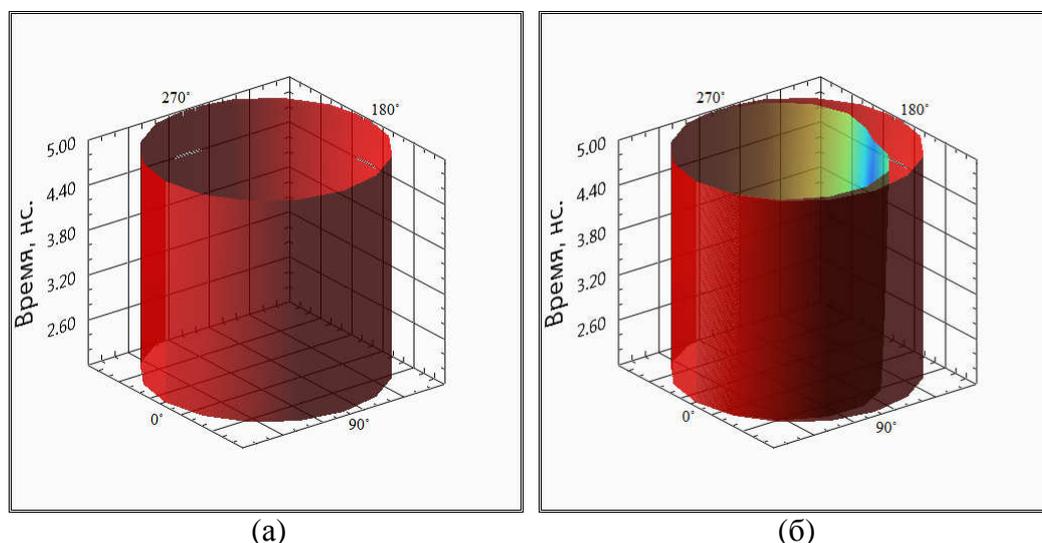


Рис. 2. Трехмерное представление временных зависимостей ВФРТ в цилиндрической системе координат для однородного (а) и неоднородного (б) случаев

Библиографический список

1. Potlov A.Y., Proskurin S.G., Frolov S.V. Three-dimensional representation of late arriving photons for the detection of inhomogeneous in diffuse optical tomography // *Quantum Electronics*. 2014. Vol. 44. №2. P. 174–181.
2. Потлов А.Ю., Галёв К.И.С., Прокурин С.Г. Регистрация неоднородностей в сильно рассеивающих средах без решения обратной задачи // *Фундаментальные исследования*. 2013. №10. С. 1019-1022.
3. Proskurin S.G., Potlov A.Y. Early- and late-arriving photons in diffuse optical tomography // *Photonics & Lasers in Medicine*. 2013. Vol.2. Iss.2. PP. 139-146. doi:10.1515 /plm-2013-0003.
4. Proskurin S.G., Potlov A.Yu., Frolov S.V. Detection of an absorbing heterogeneity in a biological object during recording of scattered photons // *Biomedical Engineering*. 2013. Vol. 46. №6. P.219-223.

ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ БАКТЕРИЦИДНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ ПРОДУКТОВ СВЧ-ЭНЕРГИЕЙ

А.О.Морозов, О.А. Морозов, В.П. Требух, А.В. Прокопенко¹
 ЗАО «НПП «Магратеп»

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
 E-mail: pav14@mail.ru

Электромагнитная энергия сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний традиционно широко используется в пищевой промышленности для процессов конвекционной и вакуумной сушки, а также для приготовления и разо-

грева [1]. Одним из актуальных направлений использования СВЧ-энергии является получение бактерицидного эффекта при обработке продуктов с малой влажностью [2-3]. В последние два десятилетия были выполнены обширные исследования по воздействию СВЧ-энергии на зерновые продукты [4-9]. Цели этих научных исследований: повышение питательности кормов и снижение энергетических затрат в процессе кормоприготовления; обеззараживание зерна и продуктов его переработки; обеззараживания и повышения функциональной активности хлебопекарных дрожжей; повышение урожайности посевных культур, обеспечения сохранности урожая и предпосевная обработка. Получение того или иного эффекта зависит от температуры нагрева, скорости нагрева и режима обработки зерна.

СВЧ-бактерицидная обработка и дезинсекция зерна состоит в следующем. Зерно, поступающее на элеватор перед закладкой на хранение, имеет высокую степень зараженности сапрофитной и фитопатогенной микрофлорой. Как правило, присутствуют бактерии родов *Pseudomonas* и *Bacillus*, дрожжи, грибы гельминтоспориозно-альтернариозно-фузариозного комплекса и плесени хранения. В процессе сушки и очистки зерна на элеваторе степень его поверхностной зараженности снижается незначительно. Общее микробное загрязнение зерна, направляемого на хранение, составляет $5 \cdot 10^6$ - $1 \cdot 10^9$ КОЕ/г. В процессе хранения происходит смена состава микроорганизмов. Большая часть эпифитных и фитопатогенных полевых микроорганизмов отмирает, и зерно заселяют возбудители плесени хранения – микроскопические грибы, которые выделяют микотоксины. Сейчас для решения этой задачи применяется химический метод обеззараживания, связанный с применением опасных химических веществ, остатки которых на зерне могут привести к серьёзному отравлению и порчи продукта. Обработка СВЧ-энергией позволяет решить проблему обеззараживания без использования вредных химических веществ.

В работах [6, 7] показана возможность обеспечить обеззараживание и дезинсекцию зерна при интенсивном СВЧ-нагреве до температур не превышающих 80 °С. Для каждого случая необходимо разрабатывать технологию и режимы СВЧ-обработки зерновых продуктов. В работе [4] рассматриваются и разрабатываются режимы обеззараживания муки в СВЧ-полях. Исследования проводились на экспериментальных установках с малой производительностью и с СВЧ-мощностью от 0,9 кВт до 5 кВт. Задача обеззараживания зерновых смесей с использованием СВЧ-энергии возникает и при производстве комбикормов для крупного рогатого скота и в птицеводстве. Таким образом, из приведенных работ [4-8] видно, что создание эффективных промышленных установок по воздействию на злаковые культуры являются актуальной задачей.

В ЗАО «НПП «Магратеп» в течение последних двух лет проводятся работы по созданию промышленной установки «Декстрин» для обработки зерновых культур в мощных электромагнитных полях СВЧ-диапазона [10, 11]. СВЧ-мощность установки достигает 25 кВт на частоте 915 МГц, что позволяет работать в режимах предпосевной обработки семян, обеззараживания зер-

на и кормоприготовления. Режимы работы установки зависят от температуры и скорости нагрева зерна. Согласно [6] для обеззараживания зерна температура нагрева должна не превышать 80 °С и с обязательной выдержкой до 5 минут. Предварительные энергетические оценки производительности установки показывают, что в режиме кормоприготовления (деструкции крахмала в пшенице) производительность может достигать до 320 кг/час, в режиме обеззараживания до 700 кг/час, а в режиме предпосевной обработки более 1500 кг/час. Подобная установка может использоваться в крупных фермерских хозяйствах для приготовления эффективных кормов в птицеводстве и животноводстве.

Рабочая камера установки «Декстрин» волноводно-проходного типа выполнена на основе волновода прямоугольного увеличенного сечения 516мм × 312мм с волной H_{10} с частичным заполнением диэлектриком. В центре волновода размещается толстостенная фторопластовая труба с внутренним диаметром 175 мм диаметра, заполненная обрабатываемым зерном. Узел ввода мощности расположен в нижней части рабочей камеры выполнен в виде поворотного рупорного перехода от прямоугольного волновода сечения 220мм × 104мм к увеличенному волноводу 516мм × 312мм. Согласование рабочей камеры с СВЧ-трактом достигается подбором угла наклона и длиной прямоугольного рупорного перехода относительно оси рабочей камеры. Для эффективной передачи СВЧ-энергии в рабочую камеру и устойчивой работы магнетрона необходимо обеспечить долговременный КСВН не выше 1,5, что позволит отказаться от использования ферритового циркулятора при работе установки. Микроволновая установка основана на магнетроне марки М-175 с регулируемой выходной СВЧ-мощностью от 10 кВт до 25 кВт на частоте 915 МГц. Источник питания магнетрона трансформаторного типа позволяет регулировать мощность током соленоидов на магнетроне. Для защиты магнетронного генератора при работе на пустую или частично заполненную зерном фторопластовую трубу на конце волноводной рабочей камеры размещаются симметричные парные водяные нагрузки, которые практически не поглощают СВЧ-мощности при нагреве зерна.

Зерно из бункера, размещенного над установкой, движется по фторопластовой трубе внутри рабочей камеры сверху вниз с использованием двухвальных самоочищающихся шнеков с производительностью от 0,1 до 2,0 т/час, расположенных на входе и выходе фторопластовой трубы. Безопасность по СВЧ-излучению из узлов ввода и вывода зерна обеспечивается запредельным характером устройства шнеков и специальными крестообразными вставками на выходе из трубопровода. Для температурной выдержки зерна используется термоизолированный шнек с регулируемой частотой вращения.

На основе промышленных микропроцессоров разработана система автоматического управления работой установки. Эта система контролирует источник питания магнетрона, работу магнетрона на высоком уровне мощности, частоту вращения шнеков, температуру зерна на выходе и безопасность работы установки. Проведен запуск и исследована работа установки на высо-

ком уровне мощности. Исследования выполнялись на пшенице. Автоматическая система позволяла регулировать температуру зерна от 40 °С до 200 °С. Проведены предварительные исследования, которые подтвердили эффект обеззараживания фуражного зерна и необходимость разработки технологий на созданной установке.

Библиографический список

1. *Рогов И.А., Некрутман С.В.* Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов // М.:Пищевая промышленность. 1976. С.212
2. *Ломачинский В.А., Бабарин В.П., Прокопенко А.В.* Эффективное использование СВЧ-энергии в пищевой промышленности // Изв. РАН. Сер. энерг. 2008. №2. С.88-98.
3. *Завьялов М.А., Лейнсон И.Н., Никонов А.О., Прокопенко А.В., Филиппович В.П.* Асептическая обработка пищевых порошков с использованием энергии электромагнитных колебаний сверхвысокочастотного диапазона // Хранение и переработка сельхозсырья. №2. 2011. С.8-13.
4. *Семенова О.Л.* Влияние режимных параметров СВЧ-установки на показатели качества пшеничной муки. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 1 (87). 2012. С.74-77.
5. *Васильев А.Н., Будников Д.А., Руденко Н.Б., Васильев А.А.* Экспериментальное исследование процессов нагрева зерна при СВЧ рециркуляции // Мех. и электр. с.-х. 2011. №11. С.28-29.
6. *Юсупова Г.Г.* Обеззараживание зерна пшеницы энергией СВЧ-поля // Хранение и переработка сельхозсырья. 2003. № 12. С.67-69.
7. *Касьяненко В.П.* Обеззараживание зерна и комбикормов в поле СВЧ // Автореф. дис. . канд. техн. наук: 05.18.12. М.,2002. С.23.
8. *Пахомов В.И., Каун В.Д.* Оптимизация тепловой обработки фуражного зерна СВЧ-энергией // Мех. и электр. с.-х. 2000. № 9. С. 8-10.
9. *Бабенко А.А.* СВЧ импульсная предпосевная обработка семян // Автореф. дис. . канд. техн. наук: 05.20.02. М.:1993. С.26.
10. *Морозов О.А., Каргин А.Н., Прокопенко А.В., Морозов А.О., Карташев С.Г.* Микроволновая установка большой производительности для обработки злаковых культур // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №3. С.178-183.
11. *Morozov O.A., Morozov A.O., Trebukh V.P., Simonenko A.N., Prokopenko A.V.* Development of industrial microwave installation for grain processing // CriMiCo 2013 - 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. 2013. P.1000-1001.

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ КОМПОЗИТНЫХ РЕСТАВРАЦИЙ IN VIVO

Н.О.Бессуднова, О.А.Шляпкинова, Э.А.Генина, С.Б.Вениг
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: nadezda.bessudnova@gmail.com

Зона соединения композитного полимерного материала и дентина является слабым звеном современных дентальных реставраций. Несмотря на значительный прогресс в развитии адгезивной технологии, дентин - поли-

мерные связи со временем деградируют в биологически активных средах. Одним из основных факторов, приводящих к деструкции интерфейсов, является гидролитическая деградация, причиной которой является недостаточная инфильтрация мономеров адгезивной системы в коллагеновые волокна деминерализованного дентина [1,2]. Возможность *in vivo*, неинвазивно выявлять скрытые дефекты на границах "твердые ткани зуба - реставрационный композиционный материал" на начальном этапе лечения, а также мониторить состояние адгезивных соединений является практически значимой задачей современной реставрационной стоматологии [3-5].

Настоящий проект направлен на разработку нового метода, позволяющего *in vivo*, *in situ*, объективно оценивать состояние адгезивных интерфейсов реставраций из современных композиционных материалов с применением методов низкокогерентной оптической компьютерной томографии (ОКТ).

В проведении экспериментов участвовали пациенты, обратившиеся к стоматологу по поводу несостоятельных реставраций с целью получения восстановительного лечения. Из пациентов была сформирована группа добровольцев, проходивших клиническое обследование и наблюдение в течение 4 лет, заключающееся в оценке их стоматологического статуса в целом и состояния адгезивных реставраций, в частности. С целью визуальной диагностики состояния дентин - полимерных адгезивных соединений использовалась экспериментальная установка на основе компьютерного оптического томографа Spectral Radar OCT Imaging System OCP 930 SR 022 с центральной длиной волны 930 нм (см рис. 1).



Рис. 1. Исследование состояния адгезивных интерфейсов с использованием низкокогерентного лазерного компьютерного томографа Spectral Radar OCT Imaging System OCP 930 SR 022

Измерения проводились в нескольких участках каждого выбранного интерфейса каждой реставрации на видимом поле 1,3x2 мм. В качестве примера на рис. 2 представлены отдаленные результаты реставрации фронтальной группы зубов неудовлетворительного качества с признаками деструктивных изменений и указанием выбранных для анализа областей.

Изображение зоны соединения, постороенное в результате воздействия на исследуемый объект низкокогерентного излучения оптического диапазона, позволило выявить скрытые полости в объеме реставрационного мате-

риала и на границе его соединения с твердыми тканями зуба. Примеры визуализации и определения характерных размеров обнаруженных дефектов, варьировавшихся для областей 7 и 8 в пределах от 0,05 до 0,23 мм, представлены на рис. 3.

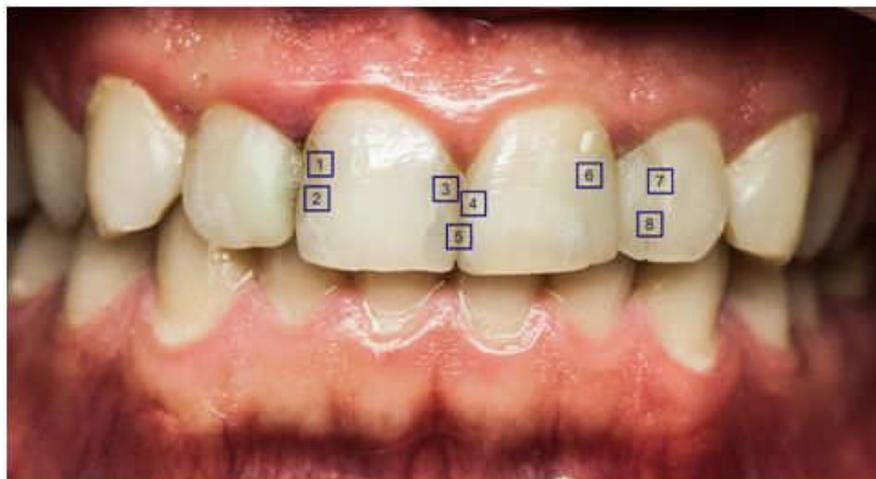
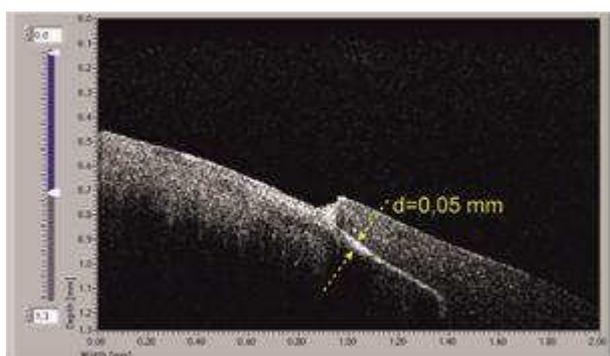
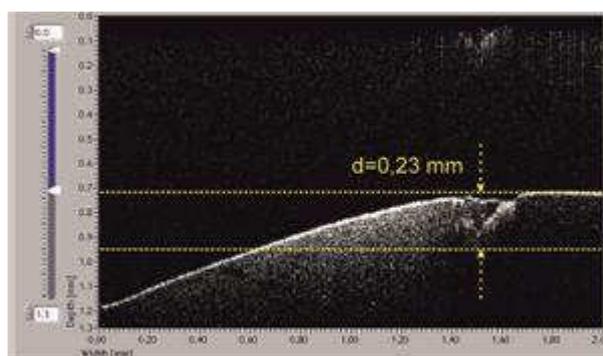


Рис. 2. Пример несостоятельной реставрации. Цифрами указаны участки анализа



а)



б)

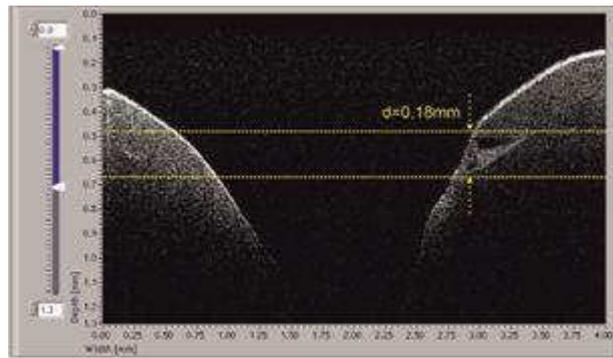
Рис. 3. Примеры дефектов (с указанием их характерных размеров) в области адгезивного соединения для участков 7 (а) и 8 (б)

В приведенном примере результаты, полученные применением ОКТ, находятся в полном соответствии с клинической оценкой состояния адгезивных интерфейсов. Однако, применение ОКТ оправдано для объективизации состояния интерфейсов реставраций, определяемых клинически как "удовлетворительные". Пример такой реставрации и результаты ОКТ, полученные с участка 1, представлены на рис. 4. Применение ОКТ позволило выявить скрытый в объёме дефект и определить его характерные размеры.

Таким образом, низкокогерентную ОКТ следует рассматривать как мощный инструмент для неинвазивного, *in vivo* исследования состояния адгезивных интерфейсов композитных реставраций. Комплексное применение стандартных методов клинической диагностики, ОКТ, цифровой обработки изображений в восстановительной стоматологии позволят объективно оценивать состояние и прогнозировать клиническую долговечность реставраций на основе композитных материалов и адгезивных систем различных поколений.



а)



б)

Рис. 4. Выбранные для анализа области адгезивных соединений (а) и результаты ОКТ для участка 1 (б)

Библиографический список

1. *Y. Liu, L. Tjaderhane, L. Breschi, A. Mazzoni, N. Li, J. Mao, D.H. Pashley and F.R. Tay.* Limitations in Bonding to Dentin and Experimental Strategies to Prevent Bond Degradation. // *Journal of Dental Research*. 2011. V 90(8). P. 953-968.
2. *L. Breschi, A. Mazzoni, A. Ruggeri.* Dental adhesion review: Aging and stability of bonded interface // *Dental Materials*. 2008. V 24. P. 90-101.
3. *N.O. Bessudnova, D.I. Bilenko, S.B. Venig, V.S. Atkin, A.M. Zacharevich.* A new x-ray adhesive system with embedded nanoparticulate silver markers for dental applications // *Proc. SPIE 8699, Saratov Fall Meeting 2012: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIV; and Laser Physics and Photonics XIV, 86990R*; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2018764> (February 26, 2013).
4. *N.O. Bessudnova, D.I. Bilenko, A.M. Zakharevich.* Application of x-ray nano-particulate markers for the visualization of intermediate layers and interfaces using scanning electron microscopy // *Proc. SPIE 8337, Saratov Fall Meeting 2011: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIII, 833709*; <http://dx.doi.org/10.1117/12.924145> (March 1, 2012).
5. *J. De Much, K. Van Landuyt, M. Peumans.* A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results // *J Dent Res*. 2005. V. 84. P. 118-132.

ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАСТМАСС, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

И.В. Запороцкова, Л.С. Элбакян

Волгоградский государственный университет

E-mail: lusniak-e@yandex.ru

На сегодняшний день полимеры достаточно широко используются в медицине и, особенно в ортопедической стоматологии. Из них изготавливают базисы съемных протезов, челюстно-лицевые и ортодонтические аппараты, различные шины, искусственные зубы, покрытия для металлических частей протезов, коронки и др. Однако установлено, что срок службы ортодонтического аппарата из быстротвердеющей пластмассы меньше продолжительности активного ортодонтического лечения [1]. Именно поэтому целью выпол-

ненного исследования явилось получение нового стоматологического полимерного материала на основе быстротвердеющей пластмассы «Карбодент», допированием углеродными нанотрубками [2-5]. Одним из ожидаемых свойств таких пластмасс является увеличение их прочности при сохранении требуемой пластичности.

Карбодент - композиционный пломбировочный материал на основе акриловых сополимеров [6]. На примере материала Карбодент покажем как внедряются УНТ в полимерные материалы.

В экспериментальной части работы был проведен подбор оптимальных условий для создания полимеров, армированных нанотрубками на основе Карбодента: расчеты и эксперименты по определению оптимальной концентрации УНТ для создания составного. Для этого мы подготовили серию образцов с различным процентным содержанием УНТ и без углеродных нанотрубок. Эти образцы были подвергнуты испытанию на твердость (измерялось по методу Бринелля) (рис.1).

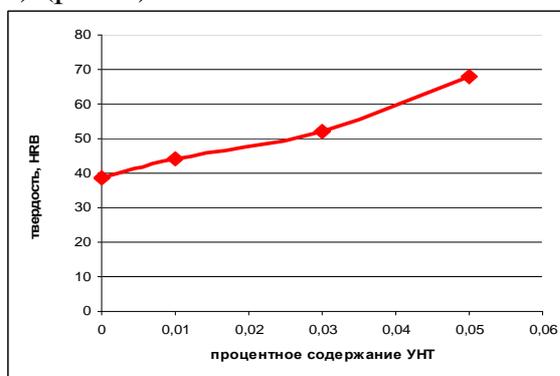


Рис.1 График зависимости среднего значения твердости материала от процентного содержания в нем УНТ.

Анализ результатов измерения твердости позволил сделать вывод о том, что даже незначительное допирование УНТ в общий объем полимерной матрицы карбодента (0,05 %) практически в 2 раза увеличивает прочность материала. Это обеспечивает существенное улучшение эксплуатационных характеристик стоматологической пластмассы без критического ухудшения его цветовой характеристики.

Чтобы доказать возможность реализации предложенного механизма, были выполнены MNDO-расчеты процесса взаимодействия основных полимерных компонентов Карбодента (метилметакрилата, бутилового метакрилата, метакриловой кислоты) и углеродных нанотрубок. Молекулы были пошагово приближены к центру УНТ перпендикулярно к ее поверхности, используя один из активных центров молекулы. В структуре молекул, были указаны некоторые наиболее активные центры, которые, по нашему мнению, способны обеспечить стабильную адсорбцию связи молекул с поверхности УНТ.

На рис.2 представлена зависимость полной энергии взаимодействия молекулы с поверхностью УНТ от расстояния между атомами связи.

Анализ энергетических кривых показал, что во всех представленных случаях для физической адсорбции необходимо преодоление энергетическо-

го барьера. Высота энергетического барьера была отождествлена с энергией активации и рассчитана вероятность преодоления этих барьеров:

а) высота энергетического барьера 3,7321эВ с вероятностью $\alpha=0,2079 \cdot 10^{-19}$ и для перехода из одного стационарного в другое состояние преодоление энергетического барьера высотой 5,60938 с вероятностью $\alpha=0,83084 \cdot 10^{-19}$.

б) высота энергетического барьера составила 3,58392эВ с вероятностью преодоления $\alpha=0,11597 \cdot 10^{-17}$, и для перехода из одного стационарного состояния в другое также необходимо преодолеть энергетический барьер высотой 4,63612эВ, и это возможно с вероятностью $\alpha=0,61919 \cdot 10^{-23}$.

в) высота первого энергетического барьера составила 1,78964эВ с вероятностью преодоления $\alpha=0,11 \cdot 10^{-8}$ и второго– 3,05017эВ с $\alpha=0,4145 \cdot 10^{-15}$.

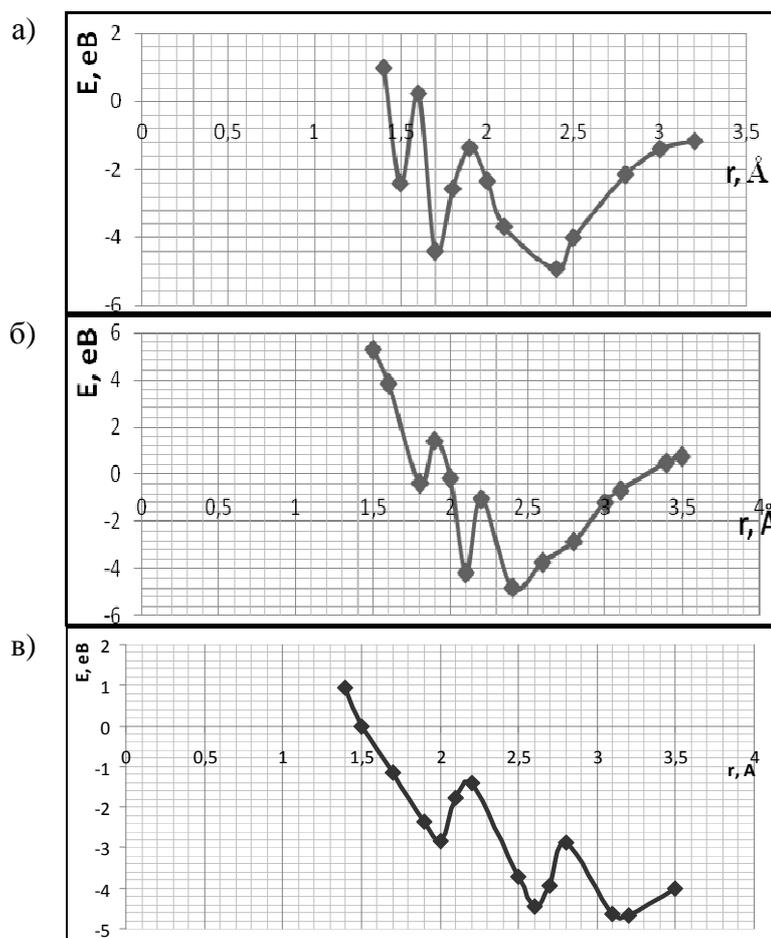


Рис.2 а) пошаговое приближение $C_4H_6O_2$ атомом водорода; б) пошаговое приближение $C_4H_6O_2$ атомом кислорода; в) пошаговое приближение $C_5H_8O_2$ атомом кислорода.

Учитывая изложенные данные можно сделать вывод о возможности создания новых полимерных нанокомпозитов на основе стоматологического материала «Карбодент», допированного углеродными нанотрубками, которые могут быть эффективно использованы как в практике ортодонтии, так и в общестоматологической практике для создания высокопрочных пломб. Подобные полимерные системы целесообразно применять для создания материалов, где прочностная характеристика материала гораздо важнее по срав-

нению с недостатками цветовой характеристики (протезов, ортодонтических аппаратов, временных протезов, индивидуальных оттискных ложек и т.д.).

Библиографический список

1. *Брель А.К., Дмитриенко С.В., Котляревская О.О.* Полимерные материалы в клинической стоматологии. // Волгоград: ООО «Бланк». 2006. С.222.
2. *Запороцкова И.В.* Углеродные и неуглеродные наноматериалы и композитные структуры на их основе: строение и электронные свойства. // Волгоград. Из-во ВолГУ. 2009. С.490.
3. *Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Avouris P.* Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and application. // Springer-Verlag. 2000. P.464.
4. *Дьячков П.Н.* Электронные свойства и применение нанотрубок. // Москва. БИНОМ. – 2010. С.488.
5. *Запороцкова И.В., Кожитов Л.В., Козлов В.В.* Перспективные наноматериалы на основе углерода // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2009-2010. № 4. С. 63 – 85.
6. *Лукьяненко В.И., Макаров К.А., Штейнгарт М.З., Алексеева Л.С.* Композиционные пломбирочные материалы. // Л. Медицина. 1988. С160.

ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ШАРОВИДНОГО ГРАФИТА

А.Н. Грибов, Г.П. Любунь, Н.О. Бессуднова, С.Б. Вениг

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: gribovan@mail.ru

Разнообразие свойств, которые присущи углероду и его соединениям, необычайно велико. Углерод и содержащие его материалы встречаются в многочисленных процессах живой и неживой природы и являются объектами фундаментальных исследований [1]. Одной из интереснейших форм углерода является графит шаровидной формы (ШГ) [2].

Шаровидный графит - малоизученная форма графита, который чаще всего связывают с получением высокопрочных чугунов с такой формой графита при модифицировании их магнием, церием, иттрием, лантаном, неодимом, празеодимом и лигатурами на их основе. Установлено, что шаровидный графит является уникальной слоисто-спиралевидной системной микро - и нанобразований, неоднородной по фазовому составу, структуре и элементному составу с преимущественно периодическим чередованием близких слоев [2]. Изображения поверхностной морфологии графита, полученные методами РЭМ, указывают на его неоднородность, наличие нескольких зон, отличных друг от друга по строению, свойствам и составу (см. рис.1).

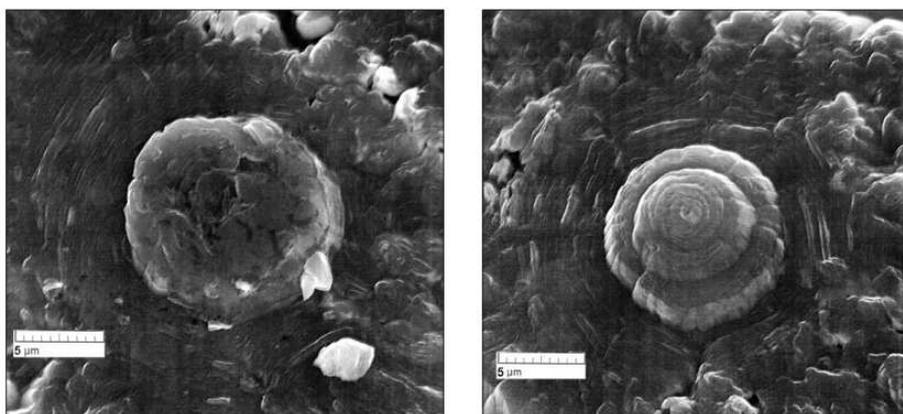


Рис.1. Фрактограммы включения шаровидного графита

Такие системы могут обладать свойствами и их сочетаниями, существенно иными, нежели отдельные микро- и наночастицы, материалы и композиты на их основе.

Перспективными направлениями применения композиционных материалов на основе полимерных волокон, полученных методом электроформования (ЭФ), и частиц графита, являются электроника, биоинженерия, медицина, токсикология (главным образом, для создания фильтров газов и жидкостей). При этом в промышленных масштабах основной продукцией являются различные фильтры (их рынок в 2020 году составит 700 млрд долларов США) и материалы для медицинских применений. Широкий интерес вызывает применение таких материалов в биоинженерии и медицине, чему посвящено большинство публикуемых в открытой печати работ [3,4].

С одной стороны, применение методов электроформования позволяет получать волокнистые материалы с заданными физико-химическими свойствами, что подчеркивает неразрывную связь в цепочке «пряделный раствор – условия процесса электроформования – микроструктура волокон и материалов – макрохарактеристики ЭФ-материалов».

С другой стороны, благодаря своей геометрии, ШГ имеет высокое отношение площади поверхности к объему, а варьируемая насыщенность связей и переменная топология указывают на перспективность создания и изучения физических, адсорбционных и каталитических свойств фильтрующих ЭФ-материалов нового поколения на его основе.

Для создания фильтрующих материалов нового поколения с микрочастицами ШГ, методами электроформования был приготовлен пряделный раствор: в смесь N,N- диметилформамида и тетрагидрофурана (в массовом соотношении 23:77) вводился полиуретан (ПУ) и микрочастицы ШГ со средним диаметром порядка 80мкм (в массовом соотношении 95:5); смесь перемешивалась в течение 2 часов при комнатной температуре.

Электроформование нетканого материала из нановолокон полимера проводилось на собранной и апробированной экспериментальной установке.

Типичные параметры электроформования, используемые в исследовании, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные параметры

| | |
|---|----------|
| Скорость подачи раствора | 0.5 мл/ч |
| Ускоряющее напряжение | 17.6 kV |
| Расстояние между иглой и собирающим экраном | 25.0 см |

Для исследования изображений поверхностной морфологии образцов нановолокон полимера ПУ и микрочастиц ШГ применялся аналитический комплекс на базе растрового электронного микроскопа высокого разрешения Mira\LMU, “Tescan” (см. рис.2).

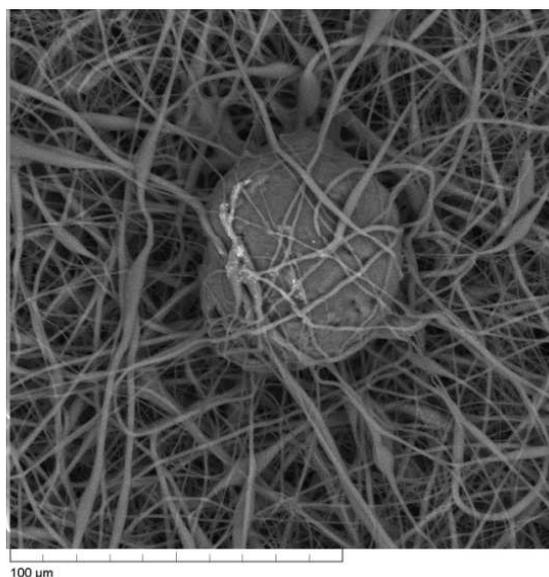


Рис. 2. РЭМ изображение поверхностной морфологии ПУ с введенными в полимерную матрицу частицами ШГ.

Проведенная серия экспериментов позволила получить опытные образцы материалов на основе полиуретана с микрочастицами ШГ, которые, как ожидается, будут обладать улучшенными сорбционными свойствами по сравнению с существующими на рынке материалами. Сами волокнообразующие полимеры, а, следовательно, и волокнистые материалы на их основе, также обладают выраженной способностью к физической и даже хемосорбции паров и газов. Детальное изучение адсорбционных свойств синтезированного материала и возможности его применения для производства одежды и предметов пролонгированной защиты для врачей, работающих в очаге контактной инфекции в эпидемических очагах, является предметом дальнейшего исследования.

Библиографический список

1. Убеллоде А.Р. Графит и его кристаллические соединения /А.Р. Убеллоде, Ф.А. Льюис; перевод с англ. Е.С. Головина, О.А. Цуханова // М. : Мир. 1965.

2. *Аникин А.А., Вениг С.Б. Биленко Д.И. Грибов А.Н.* Шаровидный графит – уникальное морфологическое образование углерода // Известия Саратовского университета. Серия Физика. 2012. Т. 12. Вып. 2. С. 18-20.
3. *Qi HJ, Teo KBK, Lau KKS, Boyce MC, Milne WI, Robertson J, Gleason KK.* Determination of mechanical properties of carbon nanotubes and vertically aligned carbon nanotube forests using nanoindentation. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2003. V.51 P.2213 – 2237.
4. *Rao CNR., Deepak FL., Gautam Gundiah, A. Govindaraj.* Inorganic nanowires. // Progress in Solid State Chemistry. 2003. V31. P.5–147.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АТОМНО-СИЛОВОЙ И РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНФИЛЬТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ В МАТЕРИАЛ ДЕНТИНА

В.С. Аткин, Н.О. Бессуднова, С.Б. Вениг

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: ceba91@list.ru

Одной из актуальных задач реконструктивной медицины является восстановление или замещение поврежденных или утраченных биологических тканей. Перспективной в этом смысле может оказаться инфильтрация ткани дентина наночастицами, иницирующими рост костной ткани. В исследованиях [1,2] в качестве таких частиц применялись наночастицы апатитов, биоактивных стекол и кремния.

Целью настоящего исследования является изучение процесса инфильтрации наночастиц серебра из коллоидного раствора в деминерализованную и минерализованную ткань дентина человеческого дентина *in vitro*. Выбор серебра как тестового материала обусловлен его рентгеноконтрастностью по сравнению с типичными тканями зуба.

Подготовка образцов заключалась в создании экспериментальных блоков дентина и их последующей деминерализации. Согласно протоколу [3] были подготовлены две группы образцов. Образцы первой группы фиксировались в 3% растворе глутеральдегида в 0.1М какодиловом буфере в течение двенадцати часов, затем промывались 0.1М какодиловым буфером для удаления глутеральдегида и затем - дистиллированной водой. Деминерализация образцов проводилась в 4N муравьиной кислоте в течение 48 ч для удаления минеральной составляющей ткани дентина. Образцы второй (контрольной) группы не подвергались деминерализации и хранились в дистиллированной воде при температуре +4°C.

Блоки дентина обеих групп инфильтрировались коллоидным раствором серебра с концентрацией 50 г/л в течение 24 ч. Образцы помещались в эппендорфы с 5 мл раствора серебра при температуре 25°C. Эппендорфы вращались в лабораторном миксере при невысоких оборотах во избежание пре-

ципитации наночастиц. Инфильтрированные блоки дентина высушивались на открытом воздухе при комнатной температуре в течение 72 ч.

Затем каждый образец обеих групп раскалывался на две части: одна половина использовалась для анализа поверхности и приповерхностного слоя дентина, вторая – для изучения плоскости поперечного скола.

Образцы исследовались методами атомно-силовой (АСМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионного рентгеновского элементного микроанализа.

В процессе деминерализации дентина большая часть минеральных компонентов растворялась и вымывалась, при этом сохранялся каркас из коллагеновых волокон. Образование пористой структуры в результате деминерализации, очевидно, должно сопровождаться увеличением удельной площади поверхности, а, следовательно, и увеличением адсорбционной ёмкости материала дентина. Для подтверждения выдвинутой гипотезы применялись методы АСМ. Было проведено сканирование 10 случайно выбранных участков размером 5 мкм² на поверхности образцов обеих групп. Сканирование проводилось в контактном режиме. Результаты измерения удельной площади поверхности приведены в табл.1.

Таблица 1. Значения удельной площади поверхности для десяти участков образцов дентина обеих групп

| | Удельная площадь поверхности, мкм ² | | | | | | | | | | Сред |
|-------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|------|
| Гр. 1 | 5,8 | 6,2 | 5,4 | 5,9 | 6 | 5,9 | 5,7 | 6,1 | 7 | 5,9 | 5,99 |
| Гр. 2 | 5,1 | 5 | 5,3 | 5,1 | 5,4 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 5 | 5,5 | 5,19 |

Результаты, приведенные в таблице, убедительно указывают на то, что удельная площадь поверхности деминерализованных образцов действительно больше таковой образцов контрольной группы.

Характер проникновения наночастиц серебра в материал дентина определялся методами РЭМ и энергодисперсионного микроанализа.

Области проведения микроанализа включали в себя дентинные канальцы и интертубулярный дентин. Микроанализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 1 нА. Усредненные результаты проведенного анализа содержания серебра представлены на диаграммах (см. рис.1).

Заметим, что проникновение серебра в дентин 1 группы превышает таковое образцов группы 2. В образцах группы 1 концентрация серебра в коллагеновой матрице (интертубулярном дентине) выше, чем в дентинных канальцах. В образцах группы 2 результаты характеризуются обратной тенденцией, что объясняется более развитой структурой дентина и увеличением межфибриллярных пространств в процессе деминерализации.

Для сравнения глубины проникновения наночастиц серебра в матрицу дентина обеих групп проводился микроанализ состава при различных ускоряющих напряжениях. Напряжение изменялось от 10 до 30 кВ с шагом в 1 кВ.

Экспериментальные данные в виде зависимости весовой концентрации серебра от ускоряющего напряжения электронного пучка представлены на рис.2.

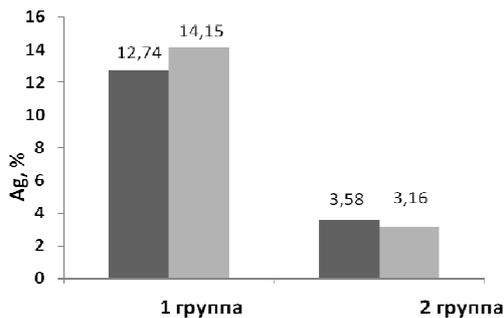


Рис. 1 Содержание серебра в образцах обеих групп. Темным цветом обозначено содержание серебра в дентинных канальцах, светлым - в интертубулярном дентине

При анализе распределения серебра в образцах 1 группы установлено, что значительное количество наночастиц аккумулируется в приповерхностном слое. Это косвенно подтверждается тем, что при уменьшении ускоряющего напряжения и, соответственно, области генерации сигнала, значение концентрации серебра увеличивается. Значительное проникновение серебра в структуру дентина объясняется увеличением межфибриллярных пространств при его деминерализации.

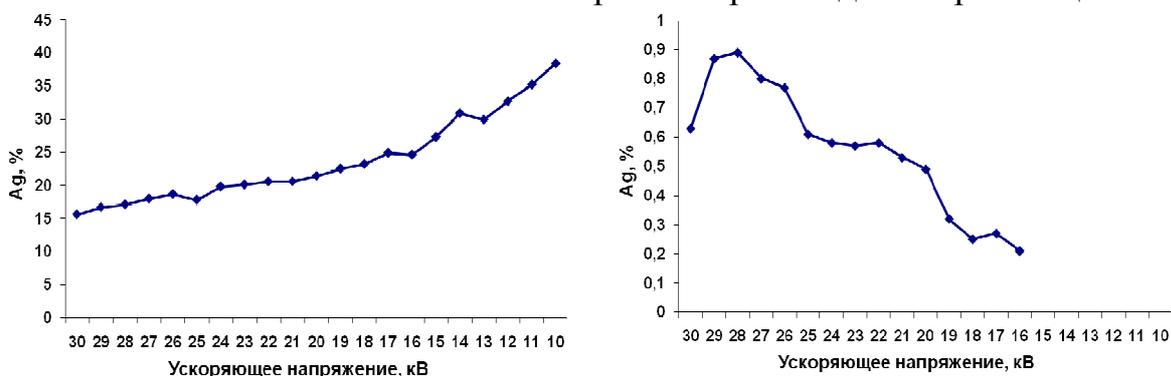


Рис.2 Зависимости весовой концентрации серебра в изучаемом объеме от ускоряющего напряжения для образцов 1 (слева) и 2 (справа) группы

Микроанализ образцов 2 группы дает противоположные результаты, то есть при уменьшении ускоряющего напряжения и области генерации сигнала уменьшается и значение содержания серебра. Такой характер зависимости может быть объяснен незначительным количеством наночастиц, проникших внутрь дентина. Вследствие этого при бомбардировке материала дентина электронами пучка генерируется небольшое количество сигналов, характеризующих серебро, а при уменьшении размеров области генерации, количество импульсов уменьшается настолько, что становится аппаратно неотличимым от фонового излучения, что наблюдается при достижении ускоряющего напряжения в 15 кВ.

Для подтверждения предположений, выдвинутых выше, был проведен микроанализ поперечных сколов дентина. Результаты микроанализа представлены на рис. 3. Распределение элементов указывает на то, что серебро проникает в объем деминерализованного образца и определяется в его внутренней структуре, в то время как в объеме недеминерализованного образца серебро не идентифицируется.

Таким образом, в настоящем проекте методами контактной атомно-силовой, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа вещества изучены особенности инфильтрации образцов деминерализованного и минерализованного дентина коллоидным раствором наночастиц серебра. Установлено: (1) увеличение удельной площади поверхности образцов дентина после процедуры деминерализации; (2) концентрация серебра в объеме деминерализованного материала значительно выше таковой в минерализованном дентине, причем интертубулярный дентин является лучшим аккумулятором серебра, нежели дентинные канальца; (3) глубина проникновения наночастиц в структуру деминерализованного дентина выше по сравнению с таковой в недеминерализованном дентине, что объясняется увеличением межфибрилярных пространств в процессе его деминерализации.

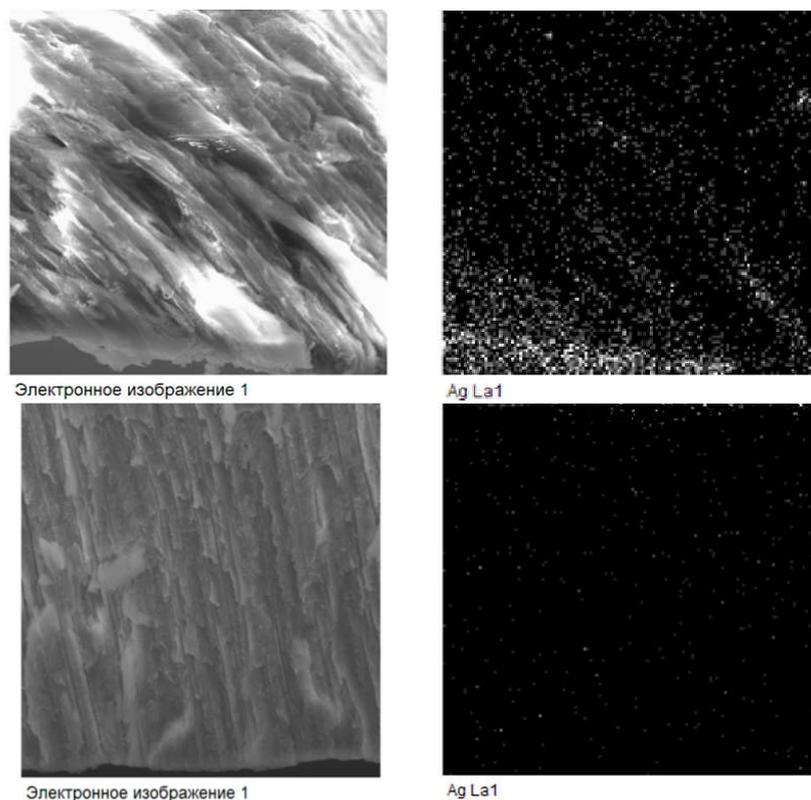


Рис.3. РЭМ-изображение морфологии поверхности и картина распределения серебра в образцах (1) сверху и (2) снизу групп

Деминерализованный дентин может рассматриваться как естественная трехмерная каркасная структура с развитой поверхностью. Наноразмерные пространства, образующиеся между коллагеновыми волокнами в процессе деминерализации дентина, могут выступать в качестве биологических «ловушек» для наночастиц и возможных центров реминерализации.

Библиографический список

1. Jeong S.H., Jang S.O., Kim K.N., Kwon H.K., Park Y.D., Kim B.I. Tooth Whitening Effect of Toothpastes containing Nano Hydroxyapatite // Key engineering Materials. 2006. №309. P.537–540.
2. Roveri N., Battistella E., Foltran I., Foresti E., Iafisco M., Lelli M., et al. Synthetic Biometric Carbonate-Hydroxyapatite Nanocrystals for Enamel Remineralization // Advanced Materials Research. 2008. V.47. N.50. P.821–824.
3. Besinis A., Van Noort R., Martin N. Infiltration of demineralized dentin with silica and hydroxyapatite nanoparticles // Dental Materials.2012. V.28. P.1012-1023.

5. ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УСИЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН В ГРАФЕНЕ С ДИФФУЗИОННОЙ НАКАЧКОЙ

И.М. Моисеенко^{1,2}, М.Ю. Морозов¹, А. Р. Давоян³, В.В. Попов^{1,2}

¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

² Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

³ University of Pennsylvania

E-mail: quikc@yandex.ru

Графен может стать основой создания усилителей и генераторов терагерцового (ТГц) излучения вследствие наличия у него запрещенной зоны нулевой ширины [1]. Для достижения усиления необходимо создание инверсного распределения концентрации носителей заряда в графене с использованием внешней накачки. Известно, что в предшествующих работах по усилению ТГц излучения в графене предполагалась прямая оптическая накачка графена. Однако при таком типе накачки в графене поглощается максимум ~ 2.3% мощности накачки [2], что существенно ограничивает эффективность таких усилителей ТГц излучения.

В данной работе исследуется усиление ТГц плазмонов в графене с диффузионной накачкой. При таком типе накачки инверсное распределение концентрации носителей заряда в графене создается диффузионным потоком носителей из полупроводниковой подложки, в которой они, в свою очередь, могут эффективно создаваться с помощью оптической накачки полупроводника.

На рис.1 схематически представлена исследуемая структура. Монослой графена нанесен на полупроводниковую подложку, которая является бесконечно длинной в x - и z -направлениях и имеет конечную толщину d в y -направлении. Излучение оптической накачки падает на тыльную поверхность подложки и генерирует в ней электрон-дырочные пары. Далее фотовозбужденные носители заряда диффундируют в графен, создавая в нем инвертированное распределение носителей заряда.

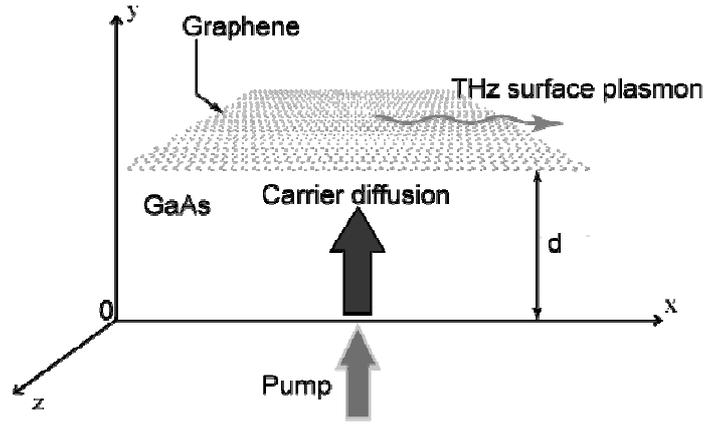


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры

Дисперсионное уравнение для двумерных (2М) плазменных волн в графене (без учета электромагнитного запаздывания) имеет вид

$$k_x = -i \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{\text{air}} + \epsilon_s) \omega}{\sigma(\omega)},$$

где k_x и ω – соответственно волновой вектор и частота плазменной волны, ϵ_{air} и ϵ_s – диэлектрические постоянные соответственно окружающей среды ($\epsilon_{\text{air}} = 1$) и полупроводниковой подложки, а $\sigma(\omega)$ – динамическая проводимость графена, определяемая выражением [3]

$$\sigma(\omega) = \left(\frac{e^2}{4\hbar} \right) \cdot \left\{ \frac{8k_B T \tau}{\pi \hbar (1 - i\omega\tau)} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_F}{k_B T} \right) \right] + \left[\tanh \left(\frac{\hbar\omega - 2E_F}{4k_B T} \right) - \frac{4\hbar\omega}{i\pi} \int_0^\infty \frac{G(\epsilon, E_F) - G(\hbar\omega/2, E_F)}{(\hbar\omega)^2 - 4\epsilon^2} d\epsilon \right] \right\},$$

где e – заряд электрона, \hbar – приведенная постоянная Планка, k_B – постоянная Больцмана, τ и T – соответственно время свободного пробега и температура газа носителей заряда в графене, E_F – эффективная энергия Ферми и $G(\epsilon, \epsilon') = \sinh(\epsilon/k_b T) / [\cosh(\epsilon/k_b T) + \cosh(\epsilon'/k_b T)]$. Величина квази-энергии Ферми в графене связана с концентрацией неравновесных носителей заряда в графене формулой $n_{\text{gr}} = (2/\pi \hbar^2 V_F^2) \int_0^\infty \epsilon d\epsilon / 1 + \exp(\epsilon - E_F/k_b T)$, где $V_F \approx 10^8$ см/с – характерная скорость носителей заряда в графене.

Для определения концентрации электрон-дырочных пар в графене необходимо решить задачу об амбиполярной диффузии носителей заряда в полупроводнике и их захвате в графен. Уравнение для амбиполярной диффузии

записывается в виде $D_a \frac{d^2 n_s}{dy^2} - \frac{n_s}{\tau_R} + \frac{\alpha}{\hbar\omega_p} p_p e^{-\alpha y} = 0$, где n_s – концентрация

электрон-дырочных пар в полупроводнике, D_a – коэффициент амбиполярной диффузии, τ_R – время спонтанной рекомбинации электрон-дырочных пар в

полупроводнике, p_p , ω_p – плотность мощности и круговая частота оптического излучения накачки, α – коэффициент поглощения мощности оптического излучения в полупроводнике. Граничные условия выбираем в виде $dn_s/dy|_{(y=0)}=0$ и $n_s|_{(y=d)}=0$. По известному распределению концентрации в подложке можно вычислить диффузионный поток носителей заряда в графен: $J_{in} = -D_a \partial n_s / \partial y|_{(y=y_{gr})}$ и концентрацию носителей заряда в графене $n_{gr} = J_{in} \tau_{gr}$, где τ_{gr} – время жизни носителей заряда в графене.

На рис. 2 представлена зависимость концентрации электрон-дырочных пар в графене от толщины подложки при фиксированных мощности накачки и временах жизни носителей заряда в подложке и графене. Как видно, максимальная концентрация носителей заряда в графене достигается при толщине

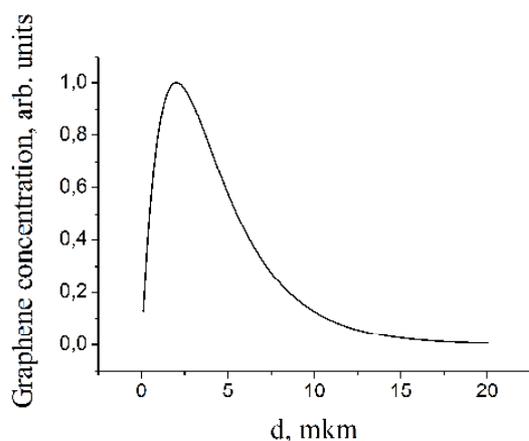


Рис. 2. Зависимость концентрации носителей заряда в графене от толщины подложки

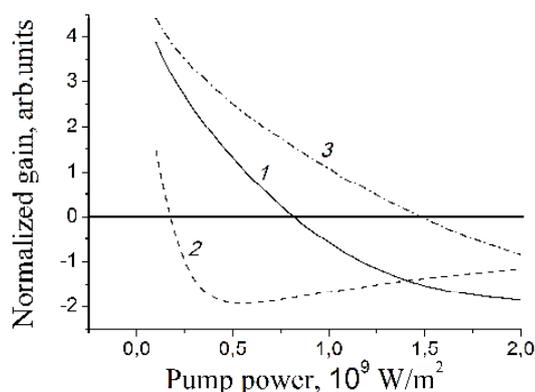


Рис. 3. Зависимость нормированного коэффициента поглощения от мощности накачки на частоте ~ 10 ТГц. 1 – $d=0.1$ мкм; 2 – $d=5$ мкм; 3 – $d=12$ мкм.

нах подложки сравнимых с длиной диффузии носителей заряда в полупроводнике (~ 3 мкм для GaAs). На рис. 3 показана зависимость коэффициента усиления от мощности накачки для различных толщин подложки d . При оптимальной толщине подложки $d=5$ мкм, значения коэффициента усиления, нормированного на длину волны плазмона (которая составляет ~ 0.15 мкм) достигают 2, что в несколько раз превышает величину усиления в структурах с прямой оптической накачкой графена [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-02-12070).

Библиографический список

1. K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, K. Kim A roadmap for grapheme // Nature. V. 490. P. 192–200.
2. R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, et al. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene // Science. 2008. V. 320. P. 1308.
3. A. A. Dubinov, V. Ya. Aleshkin, V. Mitin, T. Otsuji, V. Ryzhii. Terahertz surface plasmons in optically pumped graphene structures // J. Phys.: Condens. Matter. 2011. V. 23. P. 145302.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПЛАЗМОНОВ В ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ МЕТОДОМ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

*К. В. Машинский^{1,2}, *, Д. В. Фатеев¹, В. В. Попов^{1,2}*

¹ Саратовский филиал Института Радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Саратов,

² Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

* E-mail: xysskarl@yandex.ru

Достижения в области исследования нелинейных свойств плазменных колебаний в двумерных электронных системах (2МЭС) открывают путь к созданию высокочувствительных неохлаждаемых плазменных детекторов терагерцового (ТГц) излучения [1]. Для плазмонного детектирования ТГц излучения используются структуры на основе полевых транзисторов с двумерным электронным каналом [2,3].

Известно, что в таких структурах существуют два различных плазмонных фотогальванических эффекта, приводящих к выпрямлению ТГц излучения: эффект увлечения электронов бегущей плазменной волной [4] и эффект плазмонного храповика в поле стоячей плазменной волны [5]. При этом, в асимметричной 2МЭС возбуждаются и бегущие и стоячие плазменные волны и, таким образом, действуют оба вышеуказанных плазмонных ТГц фотогальванических эффекта.

Метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) применяется для возбуждения поверхностных и двумерных плазменных волн в ТГц диапазоне [6,7]. В данной работе рассматривается выпрямление терагерцового излучения при возбуждении плазмонов в двумерной электронной системе методом нарушенного полного внутреннего отражения. При таком методе возбуждения можно независимо возбуждать бегущую или стоячую плазменную волны в 2МЭС и, таким образом, изучать эффекты плазмонного увлечения и эффект плазмонного храповика по отдельности, что важно для сравнительного анализа этих эффектов.

При возбуждении плазменных волн в 2МЭС методом НПВО плоская однородная электромагнитная волна падает из среды призмы под углом θ относительно нормали на границу раздела призмы и слоя с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_2 (вставка в рис. 1, а). При углах падения больших угла ПВО в среде 2 существуют только эванесцентные поля, которые взаимодействуют со свободными зарядами в 2МЭС, возбуждая плазменные волны. За счет нелинейных свойств плазменные волны в 2МЭС проявляют два эффекта выпрямления ТГц излучения – эффект увлечения и эффект плазмонного храповика.

Нелинейная динамика электронов в 2МЭС в гидродинамическом приближении описывается уравнением Эйлера и уравнением непрерывности [8].

Решение гидродинамических уравнений методом теории возмущений позволяет вычислить постоянный ток, индуцированный в 2МЭС осциллирующим электрическим полем. В общем случае, в периодической 2МЭС могут действовать оба различных плазменных механизма выпрямления ТГц сигнала [5]. В пространственно однородной 2МЭС выпрямление ТГц сигнала происходит только за счет эффекта увлечения электронов бегущей плазменной волной, а в пространственно неоднородной 2МЭС – за счет эффекта плазмонного храповика под действием стоячей плазменной волны.

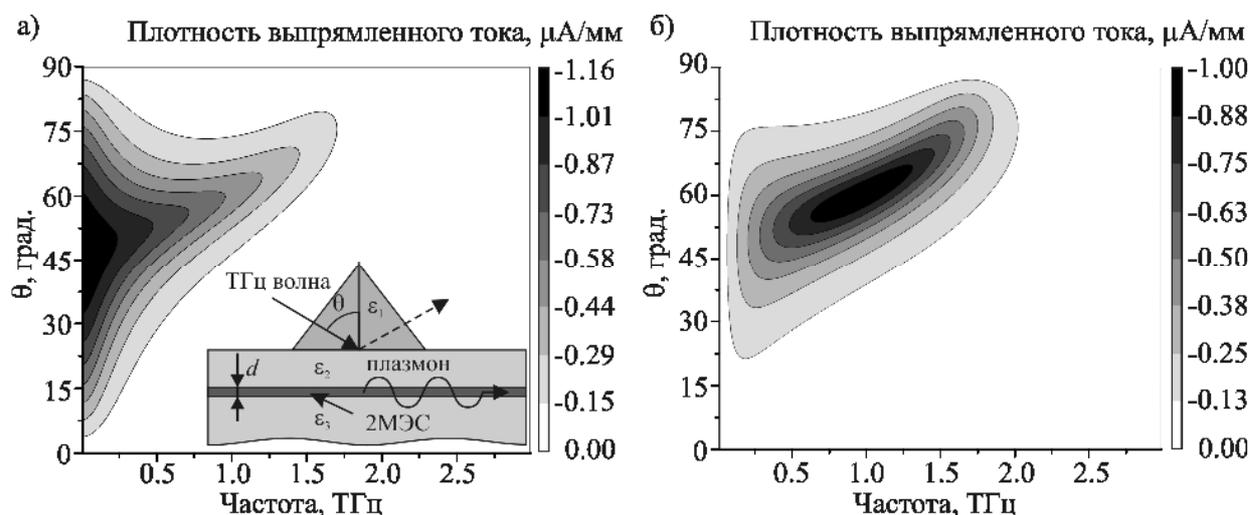


Рис. 1. Плотность электрического тока увлечения электронов (а) и плазмонного храповика (б) в зависимости от угла падения и частоты ТГц волны. На врезке панели (а) представлено схематическое изображение структуры НПВО для возбуждения плазменных волн в 2МЭС.

Расчеты для бегущей и стоячей плазменных волн в 2МЭС велись в рамках предположения об однородном распределении концентрации электронов в 2МЭС. Численные расчеты плотности выпрямленного тока проведены для 2МЭС на основе гетероструктуры GaAs/InGaAs при значении диэлектрической постоянной возбуждающей призмы $\epsilon_2 = 5000$ и толщине барьерного слоя $d = 0.25$ мкм при значении частоты релаксации импульса электронов $\gamma = 8.77 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1}$. Как видно из рис. 1, резонансное возрастание выпрямленного тока в 2МЭС происходит при углах падения, больших угла полного внутреннего отражения ($\theta > 2.5^\circ$). Плазмонное выпрямление ТГц излучения за счет эффекта плазмонного увлечения электронов (рис. 1, а) наиболее эффективно в низкочастотном диапазоне, что согласуется с теоретическими результатами работы [5], полученными в приближении заданного поля.

При численных расчетах плотности выпрямленного тока плазмонного храповика (рис. 1, б) предполагалось, что периодическое распределение равновесной концентрации электронов $N_0(x) = N_0 + \Delta N_0 \cos(2qx)$, где q – волновое число плазмона, сдвинуто по фазе на величину $\varphi = \pi/4$ в плоскости 2МЭС относительно распределения электрического поля стоячей плазменной волны для достижения максимального эффекта плазмонного храповика при

каждом значении угла падения внешней ТГц волны. Электрический ток плазмонного хряповика стремится к нулю с уменьшением частоты ТГц волны (рис. 1, б), в то время как ток плазмонного увлечения достигает своего максимального значения на низких (суб-ТГц) частотах. Это связано с разной частотной зависимостью двух вышеуказанных эффектов ТГц выпрямления.

Таким образом, в данной работе решена задача о выпрямлении терагерцового излучения за счет плазмонных нелинейностей в периодической двумерной электронной системе при возбуждении плазмонов методом нарушенного полного внутреннего отражения. Выбранная модель позволяет изучать независимо различные механизмы плазмонного выпрямления в двумерных электронных системах: эффект плазмонного увлечения электронов и эффект плазмонного хряповика.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-00813).

Библиографический список

1. Knap W., Dyakonov M., Coquillat D., Teppe F., Dyakonova N., Lusakowski J., Karpierz K., Sakowicz M., Valusis G., Seliuta D., Kasalynas I., El Fatimy A., Meziani Y.M., Otsuji T. Field Effect Transistors for Terahertz Detection: Physics and First Imaging Applications // J. Infrared Milli. Terahz. Waves. 2009. V. 30. P. 1319.
2. Teppe F., Knap W., Veksler D., Shur M. S., Dmitriev A. P., Kachorovskii V. Yu., Rumyantsev S. Room-temperature plasma waves resonant detection of sub-terahertz radiation by nanometer field-effect transistor // Appl. Phys. Lett. 2005. V.87. P. 052107.
3. Popov V.V. Plasmon Excitation and Plasmonic Detection of Terahertz Radiation in the Grating-Gate Field-Effect-Transistor Structures // J. Infrared Milli. Terahz. Waves. 2011. V. 32. P. 1178.
4. 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.
5. Popov V.V. Terahertz rectification by periodic two-dimensional electron plasma // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. P. 253504.
6. Hirori H., Nagai M., Tanaka K. Destructive interference effect on surface plasmon resonance in terahertz attenuated total reflection // Optics Express. 2005. V. 13. P. 10801.
7. Bludov V., Vasilevskiy M.I. , Peres N.M.R. Tunable graphene-based polarizer // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. P. 084320.
8. Dyakonov M., Shur M. Plasma wave electronics: novel terahertz devices using two dimensional electron fluid // IEEE Trans. Electron. Device. 1996. V. 43. P. 1640.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДИАПАЗОНА 0,1-0,2 ТГц

*С.А. Алавердян¹, А.А. Довгань², С.Ю. Молчанов¹,
А.П. Креницкий¹, В.П. Мецанов².*

¹ОАО «ЦНИИИА»

²ООО «НИКА-СВЧ»

E-mail: canishe@yandex.ru

Волны терагерцового диапазона находятся примерно между областью СВЧ и инфракрасным диапазоном. Эту область называют терагерцовая щель [1]. В этом диапазоне плохо работают как радиофизические методы обработки сигнала, так и оптические. Длина волны от 3мм до 0,03мм. Но многие вещества (жидкости, твердые тела, биологические объекты) имеют информативные спектральные характеристики именно в терагерцовом диапазоне частот. Поэтому устройства, работающие в диапазоне ТГц, могут найти применение в медицине, материаловедении, в военных системах и системах безопасности, а также в промышленности. По данным отчета «Terahertz Radiation Systems» подготовленным компанией BNC Research США, рынок терагерцовых приборов будет увеличиваться и за 5 лет (с 2011 до 2016) должен вырасти примерно на 35%.

Для развития приборов терагерцового диапазона требуется в первую очередь развитие элементной базы и снижение потерь по линиям передачи. За последние годы в этой области частот потери уменьшились со 100 дБ/км до до 1 дБ/км [2]. Для сужения рабочей области частот используют частотно-селективные поверхности [3-4]. Периодические структуры активно используются в качестве частотной селекции. Одним из вариантов являются двумерные решётки коротких щелей, сформированных в металлической фольге. Путем подбора геометрических параметров, таких, как длина, ширина щели, а также расстояний между ними можно получить полосовой фильтр с требуемыми характеристиками[5]. Но при вращении фильтра в волноводе сигнал ослабевает, щели выступают в качестве поляризатора. Поэтому лучше использовать крест в качестве периодической структуры. По электрофизическим свойствам он не уступает щели и к тому же является поляризационно-нечувствительным.

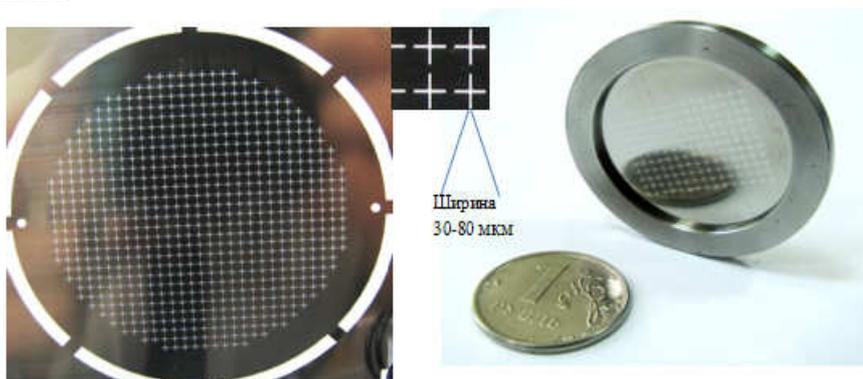


Рис. 1. Полосовой фильтр для терагерцового диапазона частот.

В данной работе были проведены теоретические расчёты с использованием метода конечных элементов в трехмерной модели, построенной в программе HFSS и изготовлен металлический полосовой фильтр на основе периодических структур (Рис. 1). Путем подбора толщины фольги, размеров и ориентации крестов удалось получить полосовой фильтр с требуемыми параметрами (Таблица 1, рис. 2). Данный экспериментальный образец выполнен по технологии струйного травления, описанной в [6], и затем помещен в металлическую обойму.

Таблица №1. Параметры однослойного ТГц фильтра

| | |
|---|-------------------|
| Центральная частота | 132 ГГц |
| Ширина полосы пропускания фильтра по уровню 3дБ | <25 ГГц |
| Собственное ослабление | <1,5 дБ |
| Температурные режимы | от +85°С до -60°С |

Измерения проводились в диапазоне 110-170ГГц на комплексе, включающем в себя векторный анализатор Rohde&Schwarz ZVA-40, 2 преобразователя частоты Rohde&Schwarz WR06 ZVA-Z170 и квазиоптический металлодиэлектрический лучевод Ø 20 мм (Рис. 3). В данной работе мы измеряли S-матрицу волноводных полосовых фильтров с частотно-селективными поверхностями в виде креста. Расчетная центральная частота фильтров составляла 132 ГГц. Характеристики полосовых фильтров оценивали по коэффициенту S21 матрицы рассеяния.

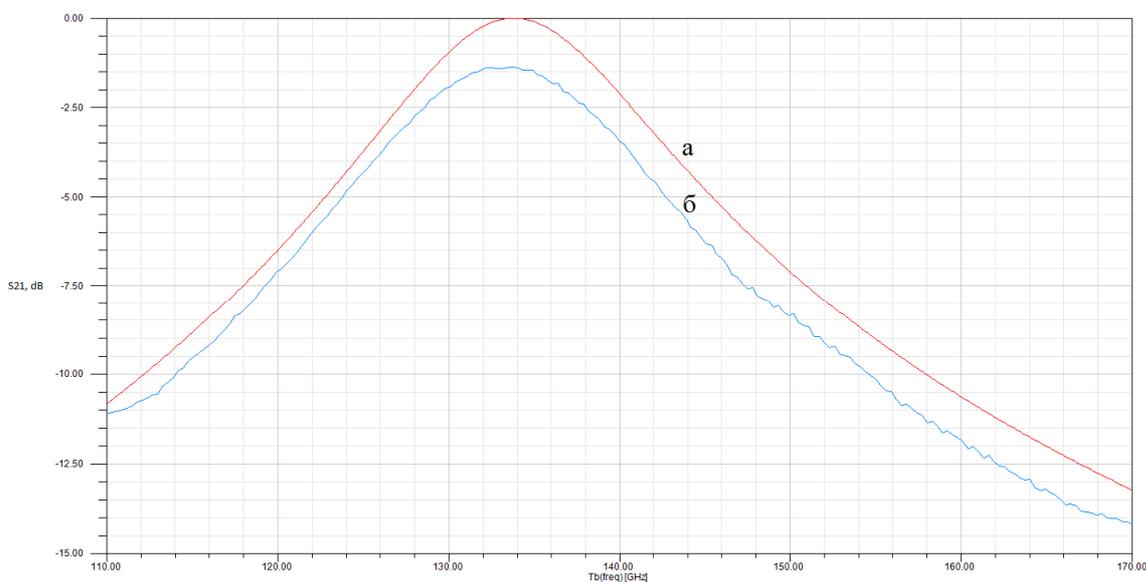


Рис. 2. Теоретическая (а) и экспериментальная (б) кривые для частотно селективной поверхности в виде крестов с шириной щели 50 мкм.

Для улучшений характеристик мы использовали каскад частотно-селективных поверхностей. Создав теоретическую модель, путем подбора расстояния между поверхностями и их ориентации, удалось совместить частотно-селективные поверхности с требуемой крутизной ослабления, при этом лишь незначительно повысив собственное ослабление (Рис. 4).

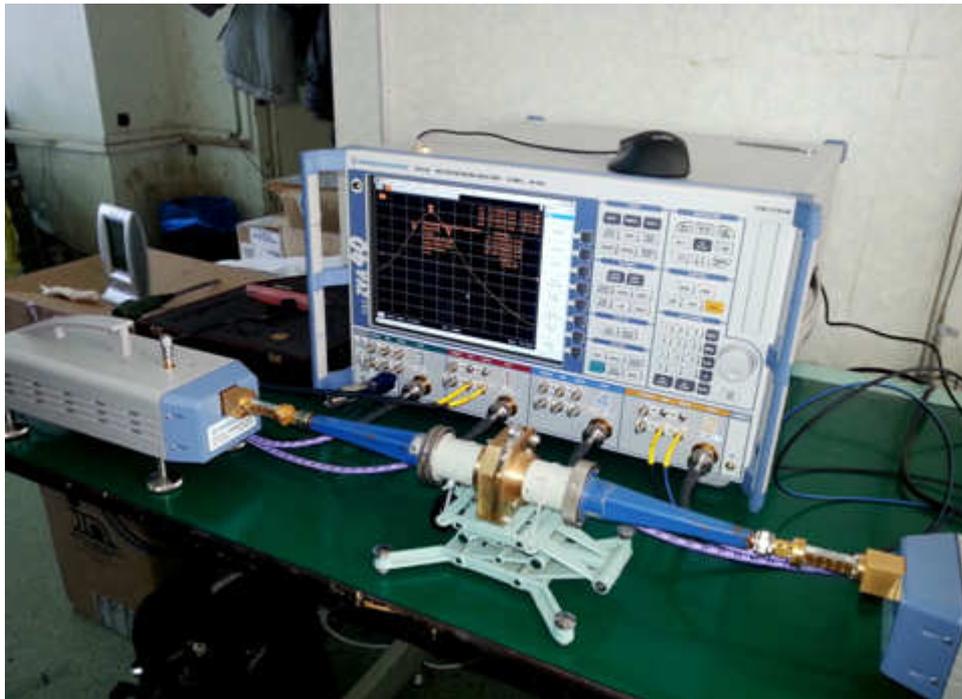


Рис. 3. Измерительная установка. Векторный анализатор Rohde&Schwarz ZVA-40, преобразователи частоты Rohde&Schwarz WR06 ZVA-Z170, линия передачи.

| | | | | | | | | |
|-------------|-----|--------|--------------------|-------------|-----|--------|--------------------|---------|
| Trc5 | S21 | dB Mag | 1.4 dB / Ref -7 dB | Mem6[Trc5] | S21 | dB Mag | 1.4 dB / Ref -7 dB | 4 (Max) |
| Mem11[Trc5] | S21 | dB Mag | 1.4 dB / Ref -7 dB | Mem15[Trc5] | S21 | dB Mag | 1.4 dB / Ref -7 dB | |
| Mem19[Trc5] | S21 | dB Mag | 1.4 dB / Ref -7 dB | Mem23[Trc5] | S21 | dB Mag | 1.4 dB / Ref -7 dB | |
| Mem27[Trc5] | S21 | dB Mag | 1.4 dB / Ref -7 dB | Mem31[Trc5] | S21 | dB Mag | 1.4 dB / Ref -7 dB | |

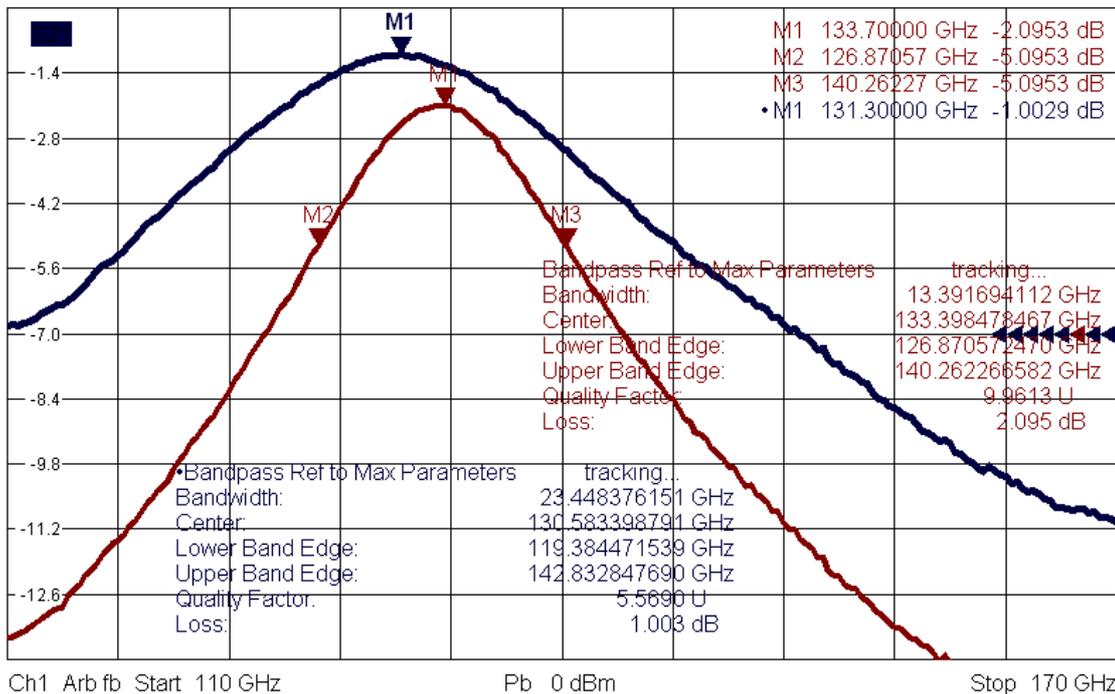


Рис. 4. Частотная характеристика параметра S21 для однослойного и двухслойного терагерцовых фильтров (с шириной щели 80 мкм).

Для однослойного полосового фильтра, ширина полосы пропускания по уровню половины мощности (уровень -3дБ) равна 23,4 ГГц. Собственное ослабление фильтра 1 дБ.

Для двухслойного полосового фильтра, ширина полосы пропускания по уровню половины мощности равна 13,4 ГГц. Собственное ослабление фильтра 2 дБ.

На Рис. 4 центральные частоты одно- и двухслойных фильтров отличаются на 3 ГГц из-за неточности при совмещении.

На Рис. 5 изображена частотная зависимость параметра передачи для 2-хслойного и 3-хслойного полосовых фильтров. Крутизна спада у трехслойного полосового фильтра значительно больше, чем у двухслойного при примерно одинаковом уровне собственного ослабления. Эти характеристики достигаются путем хорошей точности совмещения по рассчитанным данным частотно-селективных поверхностей.

Выводы.

В рамках данных исследований и разработок в ОАО «ЦНИИИА» были созданы первые экспериментальные образцы серийных полосовых фильтров для терагерцового диапазона частот. Экспериментальные данные хорошо согласуются с рассчитанной теоретической моделью взаимодействия электромагнитных волн и частотно-селективной поверхностью в форме крестов. Получены амплитудно-частотные зависимости от ширины щели и количества слоев частотно-селективных поверхностей.

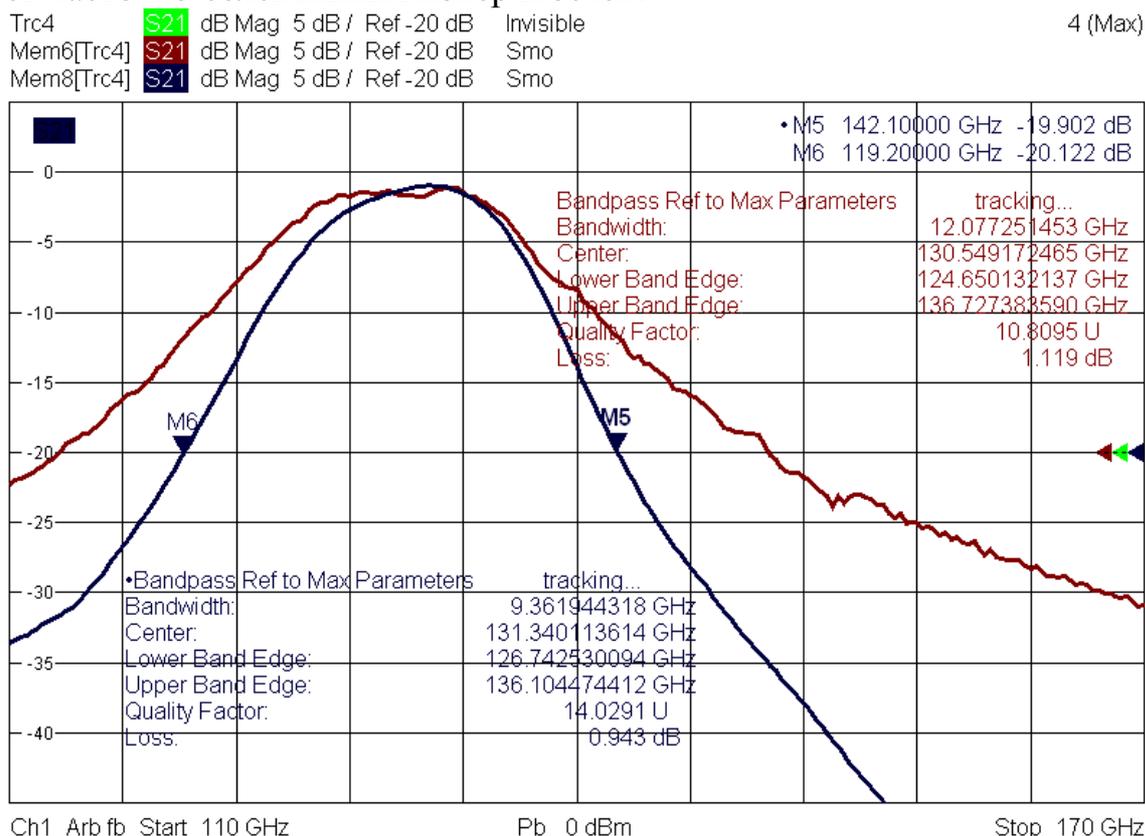


Рис. 5. Частотная характеристика параметра S21 для двухслойного и трехслойного терагерцовых фильтров (с шириной щели 60 мкм).

Библиографический список

1. Майская В. Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон. // Электроника: НТБ. 2011. №8. С.74–87.

2. *O. Mitrofanov, R. James, F.A. Fernandez, T.K. Mavrogordatos, J.A. Harrington* Reducing transmission losses in hollow THz waveguides //IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology. 2011. Vol. 1. N.1. P. 124-132
3. *Kuznetsov S.A., Arzhannikov A.V., Kubarev V.V., Gelfand A.V., Fedorinina N.I., Goncharov Yu.G., Kalinin P.V., Vinokurov N.A., Goldenberg B.G., Sorolla M.* Passive Metal Mesh Based Quasi-Optical Selective Components for Subterahertz and Terahertz Applications // Proceedings of the 39th Microwave European conference. Rome, Italy. 2009. P.826-829.
4. *Moallem M., Sarabandi K.* Miniaturized-element frequency selective surfaces for millimeter-wave to terahertz applications // IEEE Transactions on Terahertz Science and technology. 2012. Vol.2, No 3. P. 333-339.
5. *B. A. Munk.* Frequency Selective Surfaces: Theory and Design // Wiley, New York, 2000.
6. *Алавердян С.А., Боков С.И., Булгаков В.О., Зайцев Н.А., Исаев В.М., Кабанов И.Н., Катушкин Ю.Ю. Комаров В.В., Креницкий А.П., Мещанов В.П., Савушкин С.А., Сыромятников А.В., Якунин А.С.* Терагерцовый диапазон частот: электронная компонентная база, вопросы метрологического обеспечения // Обзоры по электронной технике, Серия 1 Электроника СВЧ, Москва ЦНИИ «Электроника» 2012.

СЕТОЧНЫЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

*С.А. Алавердян¹, А.А. Довгань², С.Ю. Молчанов¹,
А.П. Креницкий¹, В.П. Мещанов².*

¹ОАО «ЦНИИИА», ²ООО «НИКА-СВЧ»

E-mail: adleksey@yandex.ru

Современная терагерцовая техника активно развивается. Во многих устройствах антенной техники, электроники терагерцовых частот, радиорелейных линиях и других областях техники в настоящее время широко применяют сеточные структуры - проволочные сетки с различной формой ячеек и разной конструкции (одинарные, двойные, плоские, искривленные и т. д.), а также перфорированные металлические поверхности. Одним из направлений использования сеточных структур является использование в терагерцовой технике для создания поляризационных устройств [1,2]. Следует отметить, что устройства с сеточными структурами имеют несомненные достоинства конструктивного, эксплуатационного и экономического характера.

Электродинамические свойства металлической сеточной структуры зависят от густоты перемычек, их толщины и от направления падения электромагнитной волны. Рассмотренная модель сеточного поляризатора представляет собой одномерную решетку с перемычками прямоугольной конфигурации. Анализ электродинамических характеристик поляризатора проведен методом конечных элементов в трехмерной модели, построенной в программе HFSS. Были проанализированы сеточные структуры с разным периодом (Рис. 2).

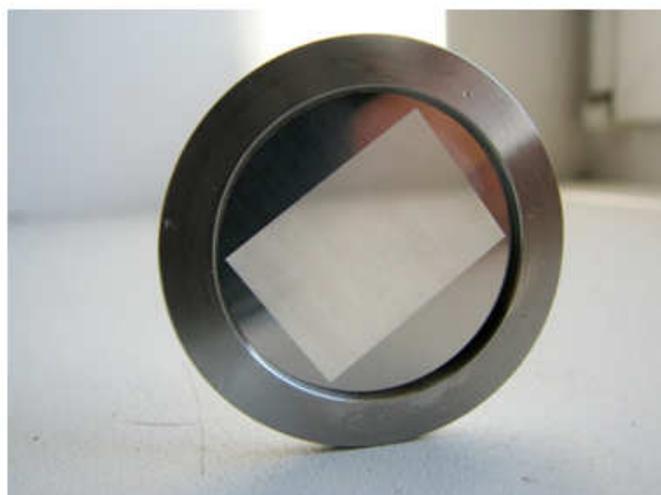


Рис. 1. Серийный сеточный поляризатор, выпускаемый ОАО ЦНИИИА.

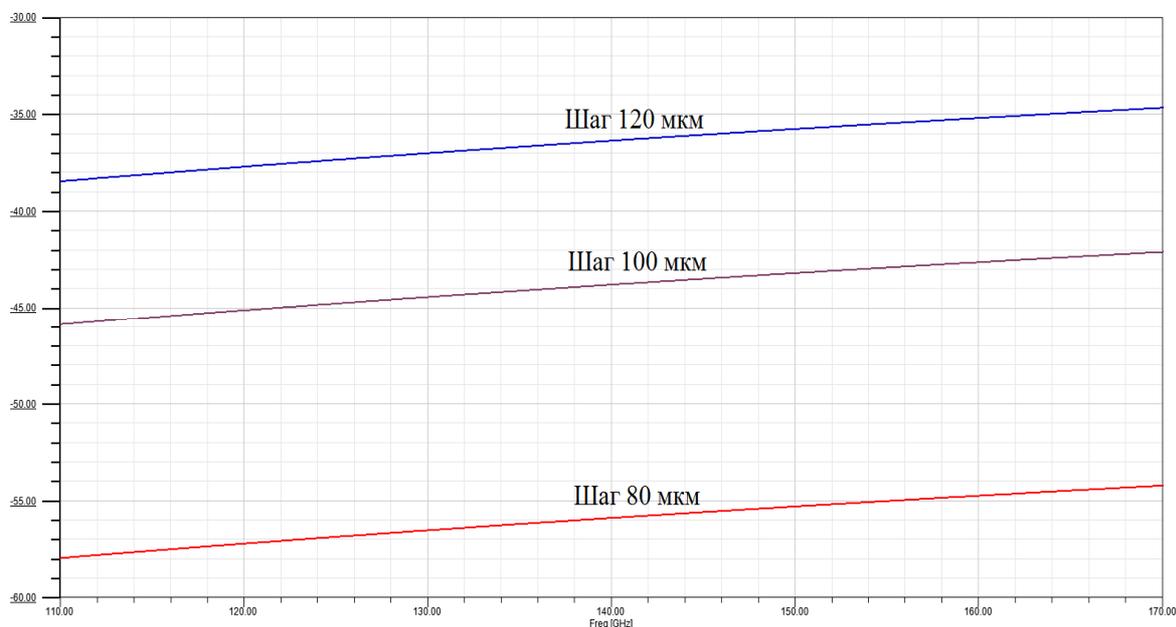


Рис. 2. Расчетное рабочее ослабление поляризаторов с шагом 120; 100; 80 мкм.

Как видно из полученных данных, пропорционально уменьшению периода решетки растёт рабочее ослабление расчетного поляризатора. Эти данные хорошо согласуются с общей теорией электродинамики сеточных структур [3].

В ОАО ЦНИИИА были созданы сеточные поляризаторы с шагом 100 мкм методом двухстороннего струйного травления [4]. Увеличенный вид поляризационной решетки приведен на Рисунке 3. Характеристики поляризационных решеток приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры разработанного образца поляризатора

| | |
|--|--------------------|
| Период решетки | 100 мкм |
| Температурные характеристики | от -60 С до + 85 С |
| Рабочее ослабление в диапазоне 110-170 ГГц | не менее 35 дБ |
| Собственное ослабление в диапазоне 110-170 ГГц | не более 0,6 дБ |

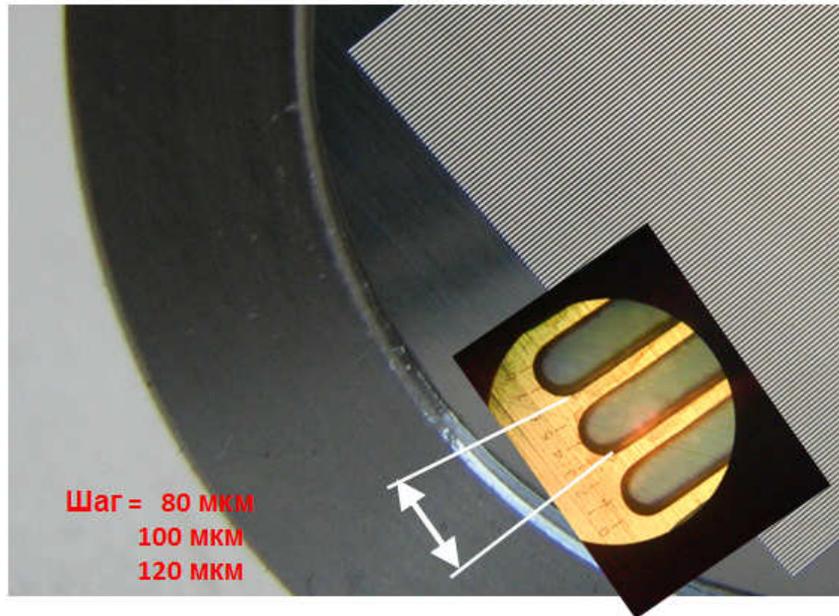


Рис. 3. Фотография фрагмента сеточного поляризатора.

Измерения амплитудно-частотных характеристик проводились в диапазоне 110-170 ГГц на комплексе, включающем в себя векторный анализатор Rohde&Schwarz ZVA-40, 2 преобразователя частоты Rohde&Schwarz WR06 ZVA-Z170 и квазиоптический тракт \varnothing 20 мм на основе лучевода (Рис. 4).



Рис. 4. Измерительная установка. Векторный анализатор Rohde&Schwarz ZVA-40, преобразователи частоты Rohde&Schwarz WR06 ZVA-Z170, металлодиэлектрический лучевод.

В данной работе измерялись параметр передачи S_{21} матрицы рассеяния и коэффициент стоячей волны (КСВ) при 2-х положениях поляризатора:

1. Когда вектор напряженности E параллелен перемычкам (рабочее ослабление, Рис. 5).
2. Когда вектор напряженности E перпендикулярен перемычкам (собственное ослабление, Рис. 6).

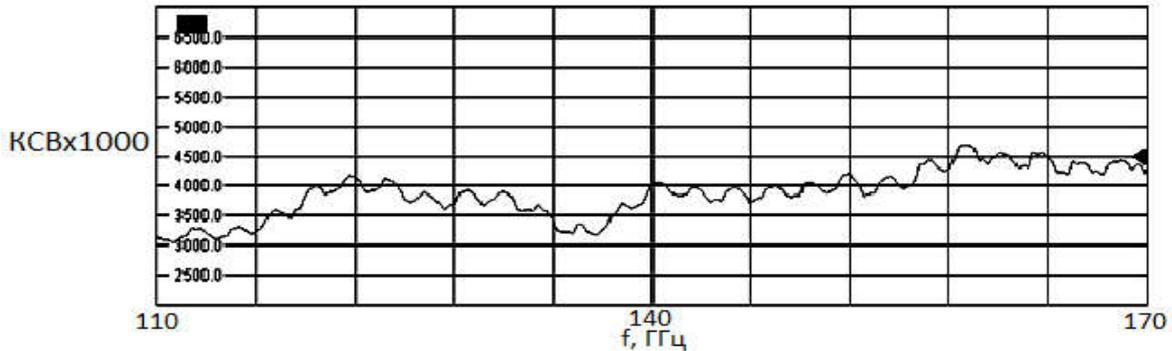
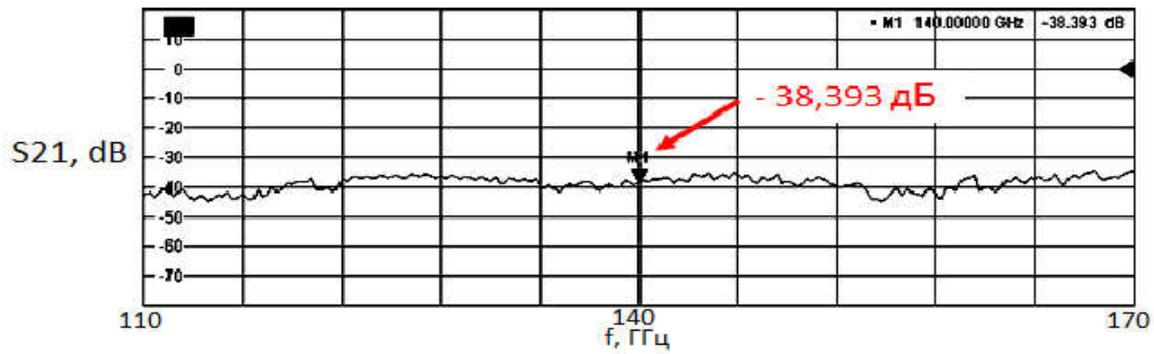


Рис. 5. Рабочее ослабление и КСВ сеточного поляризатора с шагом 100 мкм.

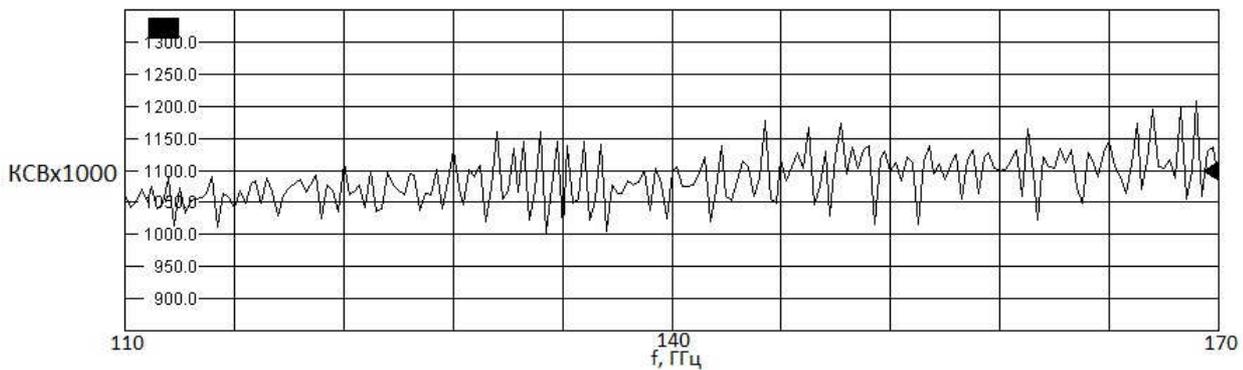
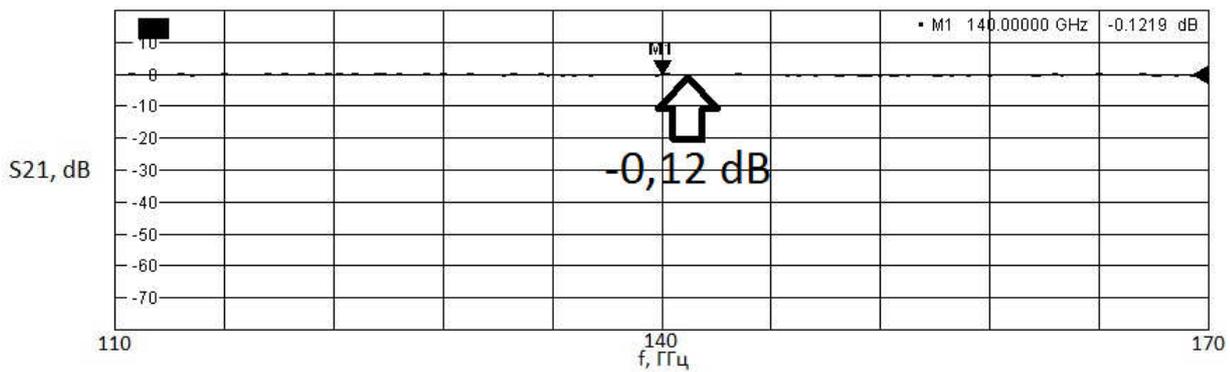


Рис. 6. Собственное ослабление и КСВ сеточного поляризатора с шагом 100 мкм.

Таким образом, в диапазоне 110-170 ГГц получены теоретические зависимости рабочего ослабления поляризатора на сеточной структуре от периода сетки. Построенная теоретическая модель для сеточной структуры с периодом 100 мкм хорошо согласуется с экспериментальным образцом поляризатора. Ломанный характер экспериментальной кривой связан с неравномерностью отражения электромагнитной волны от образца поляризатора.

Библиографический список

1. К электродинамической теории решеток / Вайнштейн Л.А. // Электроника больших мощностей. М.: Наука, 1963, вып. 2. С. 26-74.
2. Алавердян С.А., Боков С.И., Болов С.И., Зайцев Н.А., Исаев В.М., Кабанов И.Н., Комаров В.В., Креницкий А.П., Мещанов В.П., Савушкин С.А., Чиркин В.В., Якунин А.С. Устройства поляризации радиоволн в терагерцовом диапазоне частот // М.: Радиотехника. 2012. С.254.
3. Электродинамика сетчатых структур/ Конторович М.И., Астрахан М.И., Акимов В.П., Ферсман Г.А. // М.: Радио и связь. 1987. С.134.
4. Алавердян С.А., Боков С.И., Булгаков В.О., Зайцев Н.А., Исаев В.М., Кабанов И.Н., Катушкин Ю.Ю., Комаров В.В., Креницкий А.П., Мещанов В.П., Савушкин С.А., Сыромятников А.В., Якунин А.С. Терагерцовый диапазон частот: электронная компонентная база, вопросы метрологического обеспечения // Обзоры по электронной технике, Серия 1 Электроника СВЧ, Москва ЦНИИ «Электроника». 2012.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ОМИЧЕСКИМ ЭМИТТЕРОМ

*В.А. Максименко^{1,2}, А.А. Короновский^{1,2}, В.В. Макаров^{1,2}, О.И. Москаленко^{1,2},
А.Е. Храмов^{1,2}, К.Н. Алексеев³, А.Г. Баланов^{1,3}.*

¹Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

³Университет города Лафборо

E-mail: maximenkov1@gmail.com

В последнее время большое внимание уделяется научным исследованиям, связанным с использованием полупроводниковых наноструктур с периодическим потенциалом (полупроводниковых сверхрешеток) для генерации [1] и усиления [2] сигналов суб-ТГц и ТГц диапазона частот. В данном контексте особый интерес представляют сильносвязанные полупроводниковые сверхрешетки, транспорт заряда в которых осуществляется, в основном, за счет туннелирования электронов через потенциальные барьеры в пределах одной энергетической минизоны. Известно, что в подобных системах при приложении электрического поля электроны могут совершать блоховские колебания с частотой до нескольких терагерц [3]. Необходимым условием реализации такого излучения является наличие пространственно однородного распределения электрического поля. Однако, на практике реализация такого распределения проблематична в силу того, что приложенное электрическое поле приводит к развитию пространственно-временной неустойчивости и образованию областей повышенной концентрации носителей заряда (доменов), дрейфующих вдоль полупроводниковой структуры [4]. Данный эффект не позволяет получить когерентное блоховское излучение, однако, частота следования доменов заряда может достигать нескольких сотен гигагерц [5], и это явление можно также использовать для создания приборов СВЧ электроники. Очевидно, что анализ устойчивости стационарного распределения

электрического поля в сверхрешетке наряду с фундаментальным интересом имеет большое значение для практических задач, связанных как с реализацией блоховского осциллятора, так и с созданием суб-ТГц и ТГц генераторов на основе доменного транспорта.

На сегодняшний день наиболее распространенным методом анализа устойчивости стационарного состояния сильносвязанных полупроводниковых структур является приближенный nL-критерий, предложенный в работах [6,7] для исследования устойчивости в диодах Ганна. Основным недостатком данного инструмента является требование однородности пространственного распределения электрического поля в полупроводниковой структуре. Использование подобного допущения существенно снижает точность и эффективность критерия для полупроводниковых структур в случае сильно неоднородного распределения электрического поля [8]. Кроме того, nL-критерий в общем виде не учитывает особенностей, связанных с граничным условием на контакте полупроводникового образца, что приводит к необходимости его модификации при анализе влияния различных типов эмиттера [6,9].

В настоящей работе предложен метод анализа устойчивости сильносвязанных полупроводниковых структур на основе рассмотрения поведения малых возмущений стационарного состояния. Разработанный метод применен для полупроводниковой сверхрешетки GaAs-AlGaAs с периодом $d'=8.3$ нм, длиной $L'=115.2$ нм, и омическим эмиттером с проводимостью $\square' = 3788$ См⁻¹ описанной в экспериментальной работе [10]. Показано, что потеря устойчивости и образование доменов связано с появлением в системе возмущения, характеризующегося положительным значением коэффициента нарастания, при этом, обнаружена связь между частотой возникающих колебаний тока, текущего через сверхрешетку, и частотой колебаний данного возмущения. Найденное при помощи предложенного подхода пороговое значение приложенного напряжения хорошо согласуется с экспериментальными данными. В работе также проведен анализ устойчивости стационарного состояния для различных значений проводимости омического эмиттера, и определено критическое значение проводимости, при котором в системе возможна доменная генерация.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-33071), Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-345.2013.2) и Фонда «Династия».

Библиографический список

1. Greenaway M.T. et. al. Controlling and enhancing terahertz collective electron dynamics in superlattices by chaos-assisted miniband transport // Phys. Rev. B. 2009. V. 80. P. 205318.
2. Timo Hyart et. al. Model of the Influence of an External Magnetic Field on the Gain of Terahertz Radiation from Semiconductor Superlattices // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 103. P. 117401.
3. Esaki L. and Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors // IBM J. Res. Develop. 1970. V. 14. N. 1. P. 61.

4. *Büttiker M. and Thomas H.* Current Instability and Domain Propagation Due to Bragg Scattering // *Phys. Rev. Lett.* 1977. V. 38. No. 2. P. 78-80.
5. *Schomburg E. et. al.* Self-sustained current oscillations above 100 GHz in a GaAs/AlGaAs superlattice // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 74. No. 15. P. 2179-2181.
6. *McCumber D.E. and Chynoweth A.G.* Theory of Negative-Conductance Amplification and of Gunn Instabilities in "Two-Valley" Semiconductors // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 1966. V. ED-13. N. 1. P. 4-21.
7. *Kroemer H.* Nonlinear space - charge domain dynamics in a semiconductor with negative differential mobility // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 1966. V. ED-13. N. 1. P. 27-40.
8. *Koronovskii A.A. et. al.* Lyapunov stability of charge transport in miniband semiconductor superlattices // *Phys. Rev. B.* 2013. V. 88. P. 165304.
9. *Kroemer H.* The Gunn Effect Under Imperfect Cathode .Boundary Conditions // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 1968. V. ED-15. N. 11. P. 819-837.
10. *Fromhold T.M. et. al.* Chaotic electron diffusion through stochastic webs enhances current flow in superlattices // *Nature.* 2004. V. 428. P. 726.

УСИЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ В РЕЖИМЕ ДОМЕННОГО ТРАНСПОРТА

*В.В.Макаров¹, А.Е.Храмов¹, А.А.Короновский¹, В.А.Максименко¹,
О.И.Москаленко¹, С.А.Куркин¹, К.Н.Алексеев², А.Г.Баланов^{1,2}*

¹Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Университет города Лафборо, United Kingdom

Email: vladmak404@gmail.com

Полупроводниковые сверхрешетки представляют собой наноструктуру, состоящую из нескольких слоев различных (двух и более) полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны, что приводит к периодической модуляции зоны проводимости[1]. В такой структуре реализуются такие интересные квантово-механические эффекты как брегговские отражения, лестница Ванье-Штарка, последовательное и резонансное туннелирование, блоховские колебания[2]. Также, при превышении определенного порогового напряжения в данной структуре может возникать неустойчивость, приводящая к возникновению электронных сгустков (доменов), распространяющихся в продольном направлении. Частота следования этих доменов может достигать сотен гигагерц, что делает сверхрешетку перспективным элементом усилителей терагерцового и суб-терагерцового диапазона.

Использование внешних резонансных систем является широко известным методом для повышения характеристик различных устройств в оптике и радиоэлектронике. В том числе внешний резонатор может быть использован для повышения частоты генерации или усиления внешнего сигнала. В данной работе рассматривается возможность использования внешней резонансной системы для усиления высокочастотного сигнала полупроводниковой сверхрешеткой.

В работе [3] исследовано усиление внешнего сигнала в автономной сверхрешетке при изменении его частоты, проведено двухпараметрическое исследование величины усиления от напряжения питания сверхрешетки и частоты внешнего сигнала при различных амплитудах внешнего сигнала. Показано, что в автономной сверхрешетке возможно усиление только на низких частотах внешнего сигнала. Определено характерное поведение системы в клювах синхронизации и в асинхронном режиме.

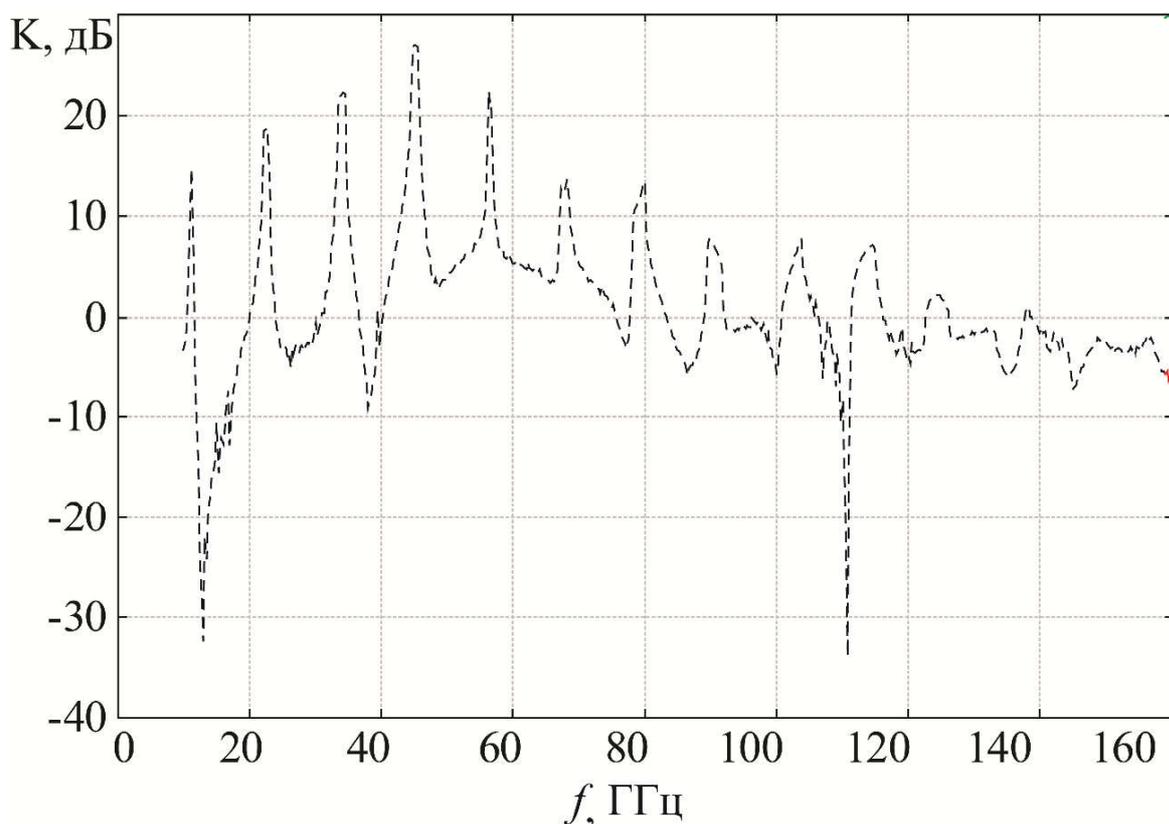


Рис. 1. Усиление внешнего сигнала при изменении частоты внешнего воздействия в сверхрешетке, помещенной во внешний резонатор. Амплитуда внешнего сигнала 20 мВ, напряжение питания 510 мВ.

Было проведено исследование усиления внешнего сигнала в сверхрешетке, помещенной во внешнюю резонансную систему при различных частотах внешнего резонатора. Обнаружено, что в данной системе существует возможность усиления внешнего сигнала на частоте, существенно превышающей частоту доменного транспорта сверхрешетки (рис. 1), которая в автономном режиме составляет 13.07 ГГц. Причем, в случае малой расстройки частоты резонатора и частоты следования доменов, наблюдаются достаточно узкие области усиления.

При увеличении частоты резонатора области усиления расширяются и смещаются на более высокие частоты, что говорит о том, что внешний линейный резонатор позволяет эффективно управлять динамикой системы и параметрами усиления. При существенном удалении частоты резонатора от частоты собственных колебаний сверхрешетки области усиления сужаются и исчезают.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-33071) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-345.2013.2) и Фонда «Династия».

Библиографический список

1. *Esaki L. and Tsu R.* Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors // IBM J. Res. Develop. 1970. V. 14. N. 1. P. 61.
2. *R. Tsu,* Superlattices to nanoelectronics, Elsevier, 2005.
3. *Timo Hyart Kirill, N. Alekseev and Erkki V. Thuneberg.* Bloch gain in dc-ac-driven semiconductor superlattices in the absence of electric domains // Phys. Rev. B. 2008. V. 77 P. 165330.

ДИНАМИКА ЛИНИИ КИСЛОРОДА В СПЕКТРЕ ГАЗОВ-ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ БРИГГСА-РАУШЕРА

А.П. Рытик, Д.А. Усанов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

E-mail: ra4csz@ya.ru

В настоящее время существует большой ряд работ о роли реактивных форм кислорода и так называемых антиоксидантов для химических и биологических сред. В работе, опубликованной в феврале 2013 года [1], впервые показано, что реактивные формы кислорода могут быть сигнальной молекулой для регулировки скорости метаболизма и, как следствие, управления процессом старения.

В работе [2] был заявлен сенсационный результат - кислород стимулировал появление биологических часов. Авторы предположили, что перокси-редоксин, фермент, участвующий в нейтрализации опасных форм кислорода в клетке, может быть основой биологических часов, универсальных для всех существующих живых организмов. Возможно, что нарушения циркадного ритма биологического объекта способны изменять реакционную способность кислорода в клетке. Из работ, опубликованных в последние два года, следует вывод, что радикальные формы кислорода могут играть роль не только окислителя, но и сигнальной молекулы, регулирующей скорость метаболизма клетки и ее процесс старения. Автор открытия автоколебательной химической реакции А.М. Жаботинский, заглядывая за горизонт науки, говорил: «...химические колебательные процессы лежат в основе механизма до сих пор еще загадочных биологических часов. Во всяком случае, между химическими автоколебательными процессами и ритмическими процессами жизнедеятельности существует явная связь» [3].

Целью настоящей работы явилось исследование динамики линии кислорода в спектре газов – продуктов реакции, во времени, в том числе при влиянии электромагнитного излучения на частотах, характерных для одного из основных природных окислителей – кислорода.

На рис. 1 и 2 представлена динамика наиболее интенсивных линий в спектре поглощения в газе, образовавшемся в ходе реакции Бриггса-Раушера, в диапазоне от 350 до 7800 см^{-1} . Исследования проводили на спектрофотометре Shimadzu-MRS-5000 (Япония) с использованием газовой кюветы, при комнатной температуре. Следует отметить, что регистрацию спектров проводили после калибровки на газовой кювете, в которой находился воздух при атмосферном давлении (Ground).

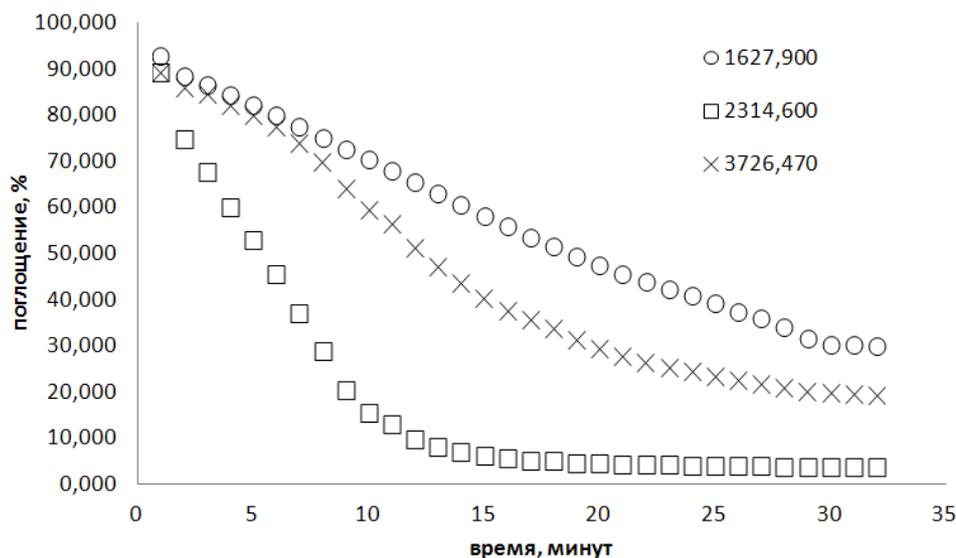


Рис. 1. Динамика линий в спектре прохождения для газа реакции Бриггса-Раушера.

Из рисунка видно, что интенсивность линий спектра пропускания возрастает со временем, что соответствует уменьшению поглощения и обусловлено ростом концентрации газа. Наибольшую скорость роста имеет линия 2314,60 см^{-1} , что соответствует линии поглощения паров воды. Кроме кислорода, в газах-продуктах реакции Бриггса-Раушера присутствуют кислород и водород: $2\text{HI} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{I}^- + 4\text{O}_2 + 4\text{H}^+$. В диапазоне сканирования линия кислорода отождествлялась с 1627,9 см^{-1} , а линии спектра водорода 3570 см^{-1} . Из рисунка 1 виден для линии 1627,9 см^{-1} более линейный характер уменьшения поглощения по сравнению с остальными линиями в спектре.

При облучении среды реакции Бриггса – Раушера электромагнитным излучением на частоте 128 ГГц, по методике, описанной в работе [4], наблюдали увеличение интенсивности выделения кислорода из среды (рис. 2).

Изменение концентрации кислорода как продукта реакции в результате влияния электромагнитного излучения может быть использовано для управления автоколебательным процессом, в частности пролонгацией автоколебаний и перезапуском реакции.

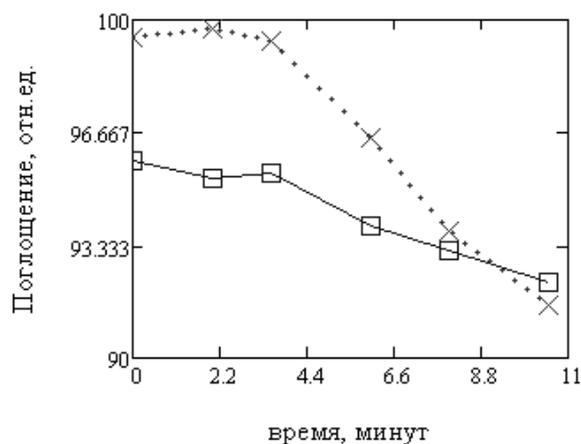


Рис.2. Динамика линии кислорода $1625,3\text{см}^{-1}$ в спектре поглощения для газа реакции Бриггса-Раушера: верхняя кривая – без облучения, нижняя кривая- с облучением.

Библиографический список

1. *Liochev S.I.* Reactive oxygen species and the free radical theory of aging // *Free radical biology & medicine*. 2013. V.60, P. 1-4.
2. *Rachel S.E., Edward W.G., Yuwei Z. et al.* Peroxiredoxins are conserved markers of circadian rhythms // *Nature*. 2012. V.485, P.459–464.
3. *Жаботинский А.М., Огмер Х., Филд Р. И др.* Колебания и бегущие волны в химических системах: Пер. с англ. / Под ред. Р.Филда и М.Бургера. // М.: Мир, 1988. 720 с.
4. *Усанов Д.А., Рытик А.П.* Влияние электромагнитного излучения на автоколебательную реакцию Бриггса–Раушера // *Журнал Физической Химии*. 2013. Т.87. № 5. С. 891–894.

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 15.04.14

Формат 60×84 1/16.

Усл.печ.л. 1697 (18,25). Тираж 125 экз. Заказ 61-Т

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