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

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

Материалы четвертой Всероссийской научной школы-семинара

Под редакцией профессора Д.А. Усанова

Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и опти-ческого излучения с полупроводниковыми микро- и нанострук-турами, метаматериалами и биообъектами: Материалы четвертой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова.— Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2017. — 111 с.: ил.

ISBN978-5-91879-760-6

Приведены результаты научных исследований по современным проблемам взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического диапазонов 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 в области твердотельной электроники СВЧ, методов диагностики наноструктур и нанокомпозитов, 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.

Редакционнаяколлегия: 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

СОДЕРЖАНИЕ

введение	6
1 ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА	7
И.В. Говорун, И.В. Подшивалов	7
ДВУХЗВЕННАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ФМР	0
Д.С. Чуб, О.В. Фарберович ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СПИНОВАЯ СТРУКТУРА ОКТАЭТИЛПОРФИРИНА КОБАЛЬТА	9
Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, И.С. Костюченко, С.Ю. Добдин, Е.И. Астахов НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР АВТОДИННОГО СИГНАЛА ПРИ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	11
А.С. Елисеева, А.А. Алебастрова, Е.А. Козлова, В.С. Аткин, А.А. Скапцов СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РОСТА ЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ	15
О.А. Савенко, К.Н. Борисенко, А.А. Скапцов СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ РОСТА НАНОСТЕРЖНЕЙ ЗОЛОТА	16
Л.М. Бабков, Н.А. Давыдова, И.В. Ивлиева, Д.С. Титоренко	19
ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДНОЙ СВЯЗИ НА ИК СПЕКТРЫ ТРИФЕНИЛФОСФИТА	22
М.И. Шишкин, А.Г. Роках ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИК СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ПЛЕНОК CdS-PbS ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ МОРФОЛОГИИ И ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ	22
2 ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ	25
В.Т. Ерофеенко	25
АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СРЕДЕ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ	
В.И. Демидчик, Р.В. Корнев	27
МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК	
Н.Е. Нефедкин, Е.С. Андрианов, А.А. Пухов, А.П. Виноградов ЭФФЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ	30
Т.С. Бочкова, В.Н. Гаврилин, С.В. Игонин, Д.А. Усанов, А.Э. Постельга МОДУЛЯЦИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРОХОДЯЩЕГО ЧЕРЕЗ МАГНИТНУЮ ЖИДКОСТЬ С НАНОТРУБКАМИ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ НАПРАВЛЕНИЕМ	31
С.Д. Бондаренко, Д.Н. Браташов, Н.А. Бурмистрова, А.А. Шувалов, А.А. Чиброва, Б.Н. Хлебцов, Ю.С. Скибина, И.Ю. Горячева КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ И ГИГАНТСКОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ НА НАНОЧАСТИЦАХ ЗОЛОТА В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ	34

М.В. Давидович	37
ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ПЛАЗМОНЫ ВДОЛЬ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ	40
В.В. Митрофанов, М.М. Слепченков, О.Е. Глухова ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВОГО 2D-КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛАУГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ/ГРАФЕН	40
Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.А. Романов АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОМЕРНОГО СВЧ ВОЛНОВОДНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВКЛЮЧЕНИЕМ	42
3 МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕСИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ	46
Ю.А. Пирогов МАГНИТНАЯ ГИПЕРПОЛЯРИЗАЦИЯ И АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ПОДХОДЫ В МРТ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ	46
В.Б. Титов, И.С. Дробот, Е.П. Полякова ЗАЩИТА ОПЕРАТОРОВ СЛОЖНЫХ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ ВРЕДОНОСНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	49
Н.А. Захаров, М.А. Орлов, Е.В. Шелехов, Л.И. Демина, А.Д. Алиев, М.Р. Киселёв, В.В. Матвеев, Т.В. Захарова, Н.Т. Кузнецов ВЛИЯНИЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗМЕР И МОРФОЛОГИЮ БИОСОВМЕСТИМОГО ГИДРОКСИАПАТИТА КАЛЬЦИЯ	51
Е.А. Козлова, В.И. Кочубей, А.К. Мырзагалиев, С.Ю. Городков ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КРОВИ КРЫСЫ ПРИ ПЕРИТОНИТЕ	54
И.Л. Пластун, А.Н. Бокарев, К.Е. Агандеева, М.С. Сивожелезов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОАЛМАЗОВ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ВЫСОКОТОКСИЧНЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ СРЕДСТВ: МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	56
М.С. Сивожелезов, И.Л. Пластун, К.Е. Агандеева, А.Н. Бокарев МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МИЦЕЛЛ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ФЛАВОНОИДОВ	59
К.И. Придачина, Э.А. Генина, А.Н. Башкатов СПЕКТРАЛЬНЫЕ, КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ САХАРОВ	62
Ю.В. Ветрова, А.А. Дорошенко, А.Э. Постельга, Д.А. Усанов СПОСОБ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗМА С ПОМОЩЬЮ СВЧ-АВТОДИННОГО ГЕНЕРАТОРА	65
С.М. Зайцев, Э.А. Генина, А.Н. Башкатов РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ГЛУБИНЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ В КОЖЕ ПРИ ОКТ - ВИЗУАЛИЗАЦИИ	68
А.Д. Усанов ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОДОСОДЕРЖАЩИЕ СРЕДЫ И БИОБЪЕКТЫ	70
А.Д. Усанов, А.Э. Постельга, Д.Г. Верхов ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДОСОДЕРЖАЩИХ ОБЪЕКТОВ В СВЧ- ДИАПАЗОНЕ	73

Д.К. Тучина, П.А. Тимошина, А.Н. Башкатов, Э.А. Генина, В.В. Тучин УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА IN VIVO				
4 ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА	79			
В.С. Тяжлов, В.Н. Посадский НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР «АЛМАЗ-ФАЗОТРОН»: ОПЫТ НЕСКОЛЬКИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЕЦИМЕТРОВОГО, САНТИМЕТРОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН	79			
$ \mathcal{L}$.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, М.К. Мерданов, С.Г. Евтеев ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНЫХ ДИАФРАГМ С НАРУШЕНИЕМ ПЕРИОДИЧНОСТИ В ВИДЕ $n-i-p-i-n$ -ДИОДНОЙ МАТРИЦЫ	84			
К.А. Гуров, Д.А. Усанов, А.Э. Постельга, Е.Ю. Дмитриева МНОГОПАРАМЕТРОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА СВЧ	87			
Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.С. Рязанов ТАММОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ В БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУРАХ НА ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ ЛИНИЯХ	90			
\mathcal{J} .А. Усанов, А.В. Скрипаль, В.Н. Посадский, В.С. Тяжлов, \mathcal{J} .В. Григорьев СВЧ-УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ВЫСОКОЙ КРАТНОСТИ С ВСТРОЕННЫМ СВЧ-КЛЮЧОМ НА $n-i-p-i-n$ -ДИОДАХ	93			
5 ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	96			
Н.В. Романова	96			
ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПАТЕНТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В.В. Попов	99			
ТЕРАГЕРЦОВОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ФОТОТОКОВ В ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ				
О.Е. Глухова, В.В. Шунаев, М.М. Слепченков, А.С. Хинд НОВЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА	102			
И.М. Моисеенко, М.Ю. Морозов, В.В.Попов УСИЛЕНИЕ ТГц ПЛАЗМОНОВ В АКТИВНОМ ГРАФЕНЕ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ НАКАЧКЕ ОПТИЧЕСКИМИ ПЛАЗМОНАМИ	104			
К.В. Машинский, Д.В. Фатеев, В.В. Попов ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПЛАЗМОННЫЙ ДЕТЕКТОР ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА	107			

ВВЕДЕНИЕ

Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» проводится с 2015 года.

В лекциях школы-семинара представлены результаты перспективных исследований по тематике конференции, приведены и продемонстрированы образцы новейших приборов и устройств. Особенностью школы будет участие в ней руководителей предприятий и главных конструкторов, разрабатывающих приборы по направлению школы-семинара. В 2017 году 90 участниками представлено 37 докладов из 7 городов России и других стран.

Известные специалисты в области полупроводниковой, СВЧ-, микро-, нано- и оптоэлектроники представили лекции для молодых ученых, аспирантов и 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 ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

ДВУХЗВЕННАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ФМР

И.В. Говорун¹, И.В. Подшивалов²
 ¹ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск
 ²ИФ им. Л.В.Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск E-mail: govorun-ilya@mail.ru

Метод ферромагнитного резонанса (ФМР) хорошо зарекомендовал себя при определении параметров ферромагнетиков. Суть метода ФМР заключается в избирательном поглощении энергии сверхвысокочастного (СВЧ) колебания образцом. Это становится возможным, если на образец подавать постоянное магнитное поле H_0 таким образом, чтобы его вектор был перпендикулярен вектору СВЧ магнитного поля $h_{\text{свч}}$. Стоит заметить, что частота ФМР зависит, как от формы и параметров образца, так и от величины смещающего поля H_0 .

Известен резонансный метод наблюдения ФМР [1]. В данном случае тестируемый образец помещают в область резонатора, где находиться максимум СВЧ магнитного поля на резонансной частоте. Регистрируя частоту резонатора и его добротность при развертке постоянного магнитного поля, несложно определить параметры исследуемого образца.

Однако в таком методе существуют ограничения. При уменьшении объема образца коэффициент заполнения резонатора, определяющий полезный сигнал, также уменьшается. Особенно остро эта проблема стоит для тонких магнитных пленок. В этой связи актуальным являются поиск и разработка оперативных и точных методов ФМР диагностики малоразмерных магнитных образцов. В последнее время появляются методики измерения пленочных образцов микронных размеров [2, 3], однако все эти методики сопряжены с высокоточными средствами изготовления, которые не всегда доступны. В данной работе предлагается датчик ФМР, изготовление которого не предусматривает высокой точности, при этом потенциально такой датчик обладает высокой чувствительностью [4, 5].

Предлагаемый датчик ферромагнитного резонанса (ФМР) представляет собой конструкцию из двух микрополосковых нерегулярных полуволновых резонаторов (см. рис. 1). Если в такой конструкции выбрать определенное расстояние между резонаторами, то на амплитудно-частотной характеристике на частотах первой полосы пропускания возникнет полюс затухания - минимум прохождения (см. рис.2 слева). Измеряемый образец (например, тонкая магнитная

пленка) помещается в зазоре между резонаторами, в области максимума магнитного СВЧ поля на частоте полюса затухания. Так как резонаторы, используемые в датчике ФМР, являются полуволновыми, то пучность СВЧ магнитного поля на первой резонансной частоте расположена в их центральной части. Именно там и помещен образец тонкой магнитной пленки (см. рис. 1).

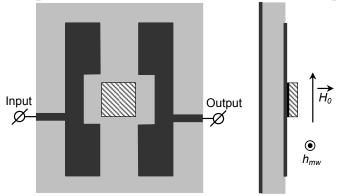


Рис. 1. Топология датчика ФМР с образцом ТМП

При изменении напряженности внешнего магнитного поля, происходит изменение магнитной проницаемости образца, что обуславливает изменение магнитного взаимодействия резонаторов. Как результат частота, на которой происходит компенсация емкостной и индуктивной связи (частота полюса) изменяется. Следует заметить, что максимальное изменение магнитного взаимодействия резонаторов произойдет при внешнем магнитном поле, равном полю ФМР (для фиксированной частоты измерения).

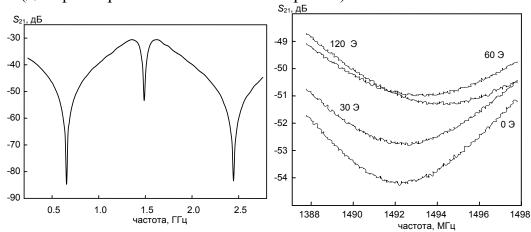


Рис. 2. Слева - частотная зависимость коэффициента прохождения устройства. Справа - AЧX датчика ФМР в окрестности полюса затухания при различных значениях внешнего магнитного поля, направленного вдоль ОТН

На рис. 1 приведена топология микрополосковой двухзвенной структуры. Полосковые проводники резонаторов выполнены из меди на поликоровой подложке (ϵ =10.6) толщиной 0.5 мм. Остальные параметры конструкции, полученные с помощью электромагнитного моделирования, следующие: длины всех

трех участков нерегулярных резонаторов 8.6 мм, их ширина 3 мм и 1.1 мм, расстояние между широкими участками 0.65 мм. Для проверки работоспособности предложенного датчика ФМР были проведены измерения параметров ТМП из пермаллоя (никель 75%, железо 25%). Пленка, толщиной 500 Å была получена магнетронным распылением на постоянном токе на подложку из ситалла квадратной формы со стороной 3 мм. Образец помещался между резонаторами (плоскость пленки параллельна плоскости подложки) в области максимального магнитного взаимодействия резонаторов друг с другом. Постоянное внешнее магнитное поле H_0 , задаваемое кольцами Гельмгольца, и перпендикулярное ему СВЧ магнитное поле, генерируемое резонаторами, находилось в плоскости пленки.

Если построить зависимость уровня ослабления на фиксированной частоте в окрестности полюса затухания, например, на частоте $1.4924~\Gamma\Gamma$ ц, от величины внешнего магнитного поля, то получится зависимость, типичная для спектра ФМР. Из спектров ФМР, полученных таким способом были определены параметры измеряемого образца на частоте $1.2645~\Gamma\Gamma$ ц: резонансные поля $24.2~\mathrm{Э}$ и $17.2~\mathrm{Э}$, ширины линии ФМР – $26.3~\mathrm{Э}$ и $25.8~\mathrm{Э}$ для ОТН и ОЛН соответственно, поле анизотропии при этом составило $3.5~\mathrm{Э}$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке $P\Phi\Phi U$ в рамках научного проекта N2 16-32-00136 мол a.

Библиографический список

- 1. *Belyaev B.A., Izotov A.V., Leksikov A.A.* Magnetic Imaging in Thin Magnetic Films by Local Spectrometer of Ferromagnetic Resonance// IEEE Sensor J. 2005. V.5. P.260–267.
- 2. Zhang H., Divan R., Wang P.Ferromagnetic resonance of single magnetic nanowire measured with an on-chip microwave interferometer // Review of scientific // Review of scientific instruments. 2011. V.82. 054704.
- 3. Schoeppner C., Wagner K., Stienen S., Meckenstock R., et al Angular depend ferromagnetic resonance ferromagnetic resonance analysis in a single micron sized cobalt stripe // J. Appl. Phys. 2014. V.116. 033913.
- 4. *Говорун И.В.*, *Лексиков А. А. Лексиков Ан.А.*, *Бабурин А.С.* Новый метод измерения спектров ФМР // Известия Высших Учебных заведений Физика. 2015. Т. 58№8/2. С.78-81.
- 5. *Говорун И.В., Лексиков А. А.* Микрополосковый датчик ФМР на основе двухзвенной структуры// Успехи современной радиоэлектроники. 2016. №11. С 238-240.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СПИНОВАЯ СТРУКТУРА ОКТАЭТИЛПОРФИРИНА КОБАЛЬТА

 $\mathcal{A}.C.$ Чуб^{1,2}, О.В. Фарберович^{1,2}

¹Южный федеральный университет

²Международный исследовательский центр «Интеллектуальные материалы» E-mail: dschub@sfedu.ru

Представлены мнимая и действительная части комплексной диэлектрической проницаемости, полученные с помощью разных значений параметра η .

Представлена зависимость количества плоских волн и памяти, выделяемой центральным процессором, от размера грани суперячейки.

При расчете функции отклика использовались как приближение случайных фаз, так и приближение нестационарного функционала плотности.

Представлены результаты *ab initio* расчетов частотной зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости октаэтилпорфирина кобальта.

Рассматривается спиновая структура октаэтилпорфирина кобальта. Описывается спиновый гамильтониан системы и перечислены составляющие. Поскольку рассматривается монометаллическая магнитная молекула, то при определении спинового гамильтониана будет учитываться только операторы расщепления в нулевом поле, зеемановского расщепления и взаимодействия с нестационарным внешним потенциалом электромагнитного взаимодействия.

$$\widehat{H}_{spin}^{(o)} = \widehat{H}_{ZFS} + \widehat{H}_{ZEE} + \widehat{H}'(t)$$

Геометрическая оптимизация молекулы и определение параметров анизотропии были выполнены в программном комплексе ADF.

В нашей работе для описания функции диэлектрической проницаемости используется модели Друде, согласно которой диэлектрическая функция состоит из тензора диэлектрической проницаемости Друде $\tilde{\epsilon}_x^{Drude}(\omega)$ и тензора поляризуемости $\alpha_x^{spin}(\omega)$:

$$\epsilon_{\scriptscriptstyle \mathcal{X}}(\omega) = \tilde{\epsilon}_{\scriptscriptstyle \mathcal{X}}^{\mathit{Drude}}(\omega) + \alpha_{\scriptscriptstyle \mathcal{X}}^{\mathit{spin}}(\omega)$$

Проведено сравнение теоретических результатов с данными эксперимента для металлического кобальта, взятых из литературы, для мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости.

Анализ показывает, что особенности в терагерцевом диапазоне диэлектрической функции связаны со спиновыми переходами и спиновым кроссовером. Особенность А3 вызвана межзонным оптических переходом в молекуле октаэтилпорфирина кобальта.

Взаимодействие внешнего нестационарного функционала с магнитным полем описывается уравнением Ландау-Лившица с учетом диссипативных эффектов

$$\frac{\partial \langle \hat{\mathbf{S}} \rangle}{\partial t} = \frac{1}{1+\lambda^2} \langle \hat{\mathbf{S}} \rangle \times \mathbf{H}_{eff}^x - \frac{\lambda}{1+\lambda^2} \langle \hat{\mathbf{S}} \rangle \times (\langle \hat{\mathbf{S}} \rangle \times \mathbf{H}_{eff}^x),$$

в котором все электроны рассматриваются как единичный спин во внешнем эффективном поле, учитывающем стационарное зеемановское расщепление и нестационарный электромагнитный потенциал. В данной модели была построена температурная зависимость магнитной восприимчивости молекулы октаэтилпорфирина кобальта, представленная на рис. 1.

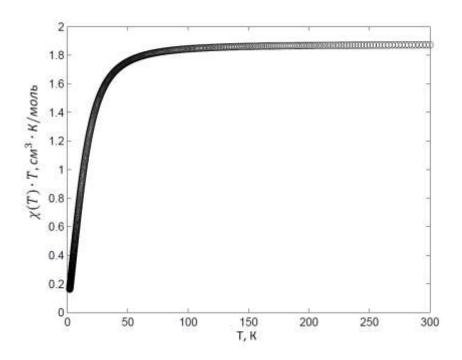


Рис. 1. Температурная зависимость магнитной восприимчивости молекулы октаэтилпорфирина кобальта

На спектре наблюдается особенность в районе 40 К, связанная со спиновым кроссовером с основного магнитного состояния в возбужденное.

Библиографический список

1. Yu A.Y-C., Donovan T.M., Spicer W.E. Optical Properties of Cobalt // Physical Review. 1968. V. 167, P. 670-673.

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР АВТОДИННОГО СИГНАЛА ПРИ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, И.С. Костюченко, С.Ю. Добдин, Е.И. Астахов Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: skripalav@info.sgu.ru

В настоящее время для определения расстояния до объекта хорошее обоснование получили лазерные методы, основанные на токовой модуляции лазерного излучения [1,2]. Применение полупроводниковых лазеров в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения открывает возможности создания малогабаритных измерительных систем. В то же время существенное развитие получило новое направление интерферометрии с оптической обратной связью, известное как автодинная интерферометрия [3,4]. Развитие этого направления, позволившее решить задачи определения направления движения

исследуемого объекта, определения нановибраций и микросмещений, расстояния до объекта, связано с использованием токовой модуляции излучения полупроводникового лазера [5-8].

В литературе описано применение линейной токовой модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера [2,5,6].

В [9,10] было предложено использовать метод гармонической модуляции длины волны лазерного излучения, который обладает как преимуществами, так и недостатками по сравнению с методом пилообразной модуляции. Целью работы явился анализ разброса значений при измерении расстояния с помощью полупроводникового лазера, работающего в режиме гармонической модуляции длины волны лазерного излучения, описанного в работах [9,10].

Измерения проводились на установке, изображение которой представлено на рис. 1. В состав установки входили частотно-модулированный полупроводниковый автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 нм — 1, излучение которого направлялось на объект — 4, закрепленный на устройстве микромеханической подачи— 5, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял 1 мм. Модуляция длины волны излучения проводилась посредством модуляции тока питания лазера с помощью встроенного в учебную лабораторную станцию виртуальных приборов NIELVIS генератора сигналов — 3. Рабочий режим тока питания лазерного диода задавался блоком управления током питания — 2.

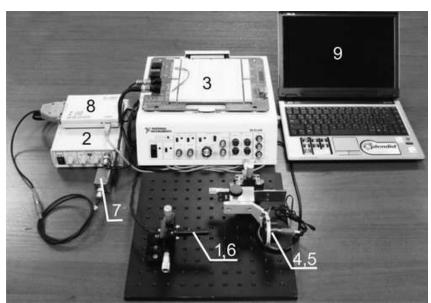


Рис. 1. Вид экспериментальной установки:

1 – полупроводниковый лазер, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NIELVIS, 4 – объект, 5 – микромеханическая подача, 6 – фотоприемник, 7 – фильтр переменного сигнала, 8 – АЦП, 9 – компьютер.

Отраженное от объекта излучение направлялось в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником – 6. Продетекти-

рованный и усиленный сигнал с фотоприемника, проходил через фильтр переменного сигнала — 7 и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя — 8 (с частотой дискретизации 100 кГц), соединенного с компьютером - 9. Параметр девиации частоты излучения лазерного диода ω_A измерялся с помощью спектрометра высокого разрешения SHR (SolarLaserSystems).

На рис. 2 приведен вид автодинного сигнала и его спектр, полученный при использовании метода гармонической токовой модуляции при девиации частоты излучения, равной $\omega_{\scriptscriptstyle A} = 132 \cdot 10^8$ рад. /сна расстояниях40 и 60см.

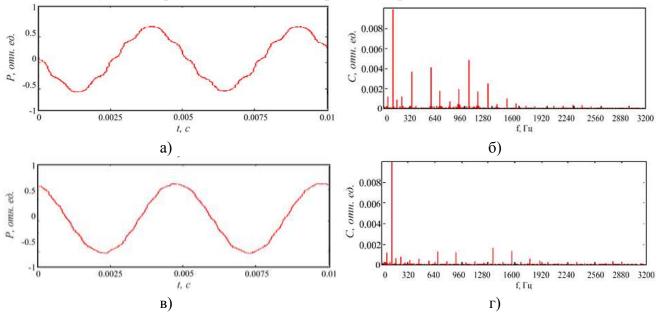


Рис. 2. Частотно-модулированные автодинные сигналы (а, в) и их спектры (б, г), полученный на экспериментальной установке на расстоянии 40 и 60 см соответственно при девиации частоты излучения лазерного диода $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ рад. /с

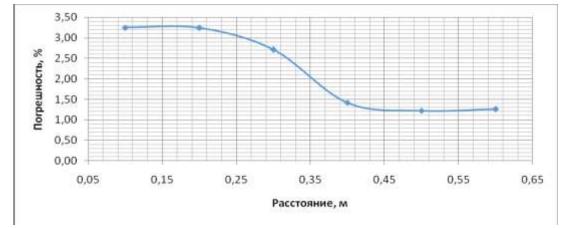


Рис.3. Зависимость погрешностей измерений от измеряемого расстояния для метода автодинного детектирования с гармонической токовой модуляцией.

Для определения разброса значений измеряемых расстояний проводились четырехкратные измерения на фиксированном расстоянии обоими представ-

ленными методами. На рис.3 представлена зависимость разброса измеряемых значений от расстояния в диапазоне от 10 мм до 42 мм.

Как видно из рис.3, разброс значений на расстоянии более 40 см почти в два раза меньше, чем на расстоянии 10-12 см. При этом в спектре автодинного сигнала появляются гармоники с большими номерами.

Таким образом, показано уменьшение относительной погрешности измерений расстояния до объекта при увеличении расстояния до него за счет обогащения низкочастотного спектра автодинного сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. *Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., and Rioux M.* Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement // Opt. Eng. 2001. Vol. 40, № 1. P. 10–19.
- 2. Соболев В.С., Кащеева Γ .А. Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // Автометрия. 2008. Т. 44, № 6. С. 49-65.
- 3. *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. Перевод: Usanov D.A., Skripal A.V. Measurement of micro-and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes // (2011) Quantum Electronics, 41 (1), pp. 86-94.
- 4. *Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T.* Laser diode self-mixing technique for sensing applications // J. Opt. A: PureAppl. Opt. 2002. Vol. 4,№ 6.P. 283–S294.
- 5. *Norgia M., Giuliani G., Donati S.* Absolute Distance Measurement With Improved Accuracy Using Laser Diode Self-Mixing Interferometry in a Closed Loop // IEEE transaction on instrumentation amd measurement. 2007. Vol. 56, № 5. P.1894-1900.
- 6. *Guo D., Wang M.* Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement // Appl.Opt. 2007. Vol. 46, № 9. P. 1486–1491.
- 7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И. Определение амплитуды вибраций с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина// Квантовая электрони-ка.2014.-т.44, №2 с.184-188.Перевод: UsanovD.A., SkripalA.V., AstakhovE.I. Determination of nanovibration amplitudes using frequency-modulated semiconductor laser autodyne // (2014) Quantum Electronics, 44 (2), pp. 184-188.
- 8. *Scalise L., Yu YG., Giuliani G., Plantier G., Bosch T.*Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement. // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2004. Vol.53, Iss. 1, P. 223-232
- 9. Астахов Е. И., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 3 С. 12-18:
- 10. *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. Вып 21. С. 72-77.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РОСТА ЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

А.С. Елисеева, А.А. Алебастрова, Е.А. Козлова, В.С. Аткин, А.А. Скапцов Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского E-mail: erythrocyte-28@yandex.ru

Наночастицы диоксида кремния, как силикагельный мезапористый материал, нашли широкое распространение от электроники до медицины. В многочисленных исследованиях были подчеркнуты особые характеристики наночастиц диоксида кремния для повышения эффективности терапевтических агентов в опухолевых клетках или в качестве медицинских инструментов для биосенсорной визуализации ткани [1]. В литературе хорошо описаны методы синтеза наночастиц, в частности метод Штобера [2], который основан на гидролизе тетраэтоксисилана (TEOS) в водно-спиртовой среде в присутствии гидроксида аммония в качестве катализатора.

Также были разработаны и усовершенствованы методы нанесения слоя диоксида кремния в качестве защитного покрытия на другие наноразмерные структуры [3]. В частности, покрытие золотых наноструктур описано в работе [4], где автор отмечает, что успех покрытия зависит от скорости гидролиза TEOS.

В работе представлены результаты исследования скорости гидролиза TEOS, по средствам разработанного спектрального метода. Было смоделировано и реализовано посредством 3D-принтера пластиковое кюветное отделение, в которое помещались образцы для исследования. В режиме реального времени измерялись спектры пропускания 50 мм кюветы, в которой происходил синтез наночастиц диоксида кремния. По полученным спектрам была построена зависимость оптической плотности на длине волны 500 нм от времени синтеза (рис. 1). С помощью электронного микроскопа MiraIILMU (Tescan, Чехия) были исследованы формы и размеры полученных наночастиц (рис. 2).

Метод синтеза. На общий реакционный объем смеси 4мл приходилось 3,218 мл изопропилового спирта (C_3H_8O), 0,125 мл водного раствора аммиака (NH_4OH), молярность которого равна 2 моль/л, и 0,03 мл TEOS ((C_2H_5O) $_4Si$), молярностью 0,28 моль/л. В мерный стакан заливали 2 мл изопропилового спирта, предварительно поставив его на магнитную мешалку. Скорость перемешивания составляли 130 об/мин при комнатной температуре. Далее к изопропиловому спирту вливали водный раствор аммиака и добавляли оставшуюся часть изопропилового спирта. Затем, переливали реакционную смесь из мерного стакана в кюветное отделение и добавляли TEOS. Сразу после добавления и перемешивания начинался процесс регистрации спектров. Через несколько минут реакции, раствор начинал мутнеть и приобретать белый оттенок.

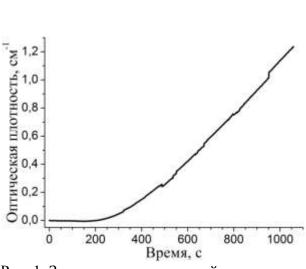


Рис. 1. Зависимость оптической плотность от времени гидролиза TEOS.

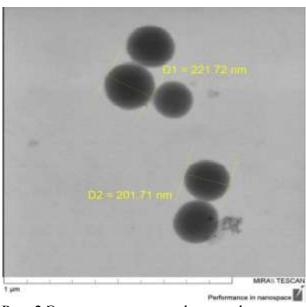


Рис. 2.Электронная микрофотография наночастиц диоксида кремния.

По результатам исследования можно сделать вывод, что при гидролизе TEOS оптическая плотность увеличивается линейно с течением времени.

Библиографический список

- 1. Sergent J.-A.; Paget V., ChevillardS. Toxicity and genotoxicity of nano-SiO2 on human epithelial intestinal HT-29 cell line // Annals of occupational hygiene, 2012, V.56, I.5, P. 622-630
- 2. Stober W., Fink A. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range // Journal of colloid and interface science, 1968, V.26, P.62-69
- 3. *Chen Y.-Sh., Frey W., Kim S., Kruizinga P., Homan K., Emelianov S.* Silica-coated gold nanorods as photoacoustic signal nanoamplifiers // Nano letters, 2011, V.11, I.2, P.348-354
- 4. *Karg M., Pastoriza-Santos I., Perez-Juste J., Hellweg T., Liz-MarzanL.M.*Nanorod-coated PNIPAM microgels: Thermoresponsive optical properties // Small, 2007, V.3, No.7, P.1222–1229

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ РОСТА НАНОСТЕРЖНЕЙ ЗОЛОТА

О.А. Савенко, К.Н. Борисенко, А.А. Скапцов Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского E-mail: olga-savenko95@mail.ru

Наностержни (HC) золота широко применяются в биомедицине, в том числе для диагностики и терапии онкологических новообразований. Высокая эффективность рассеяния и поглощения лазерного излучения частицами золота, связанна с эффектом плазмонного резонанса. Положение максимума плазмонного резонанса зависит от их размера и формы. Так, для наностержней золота максимум плазмонного резонанса может находиться в промежутке от зелёной до инфракрасной областей спектра [1]. Влияние на форму и размер наночастиц

золота оказывает большое количество факторов, таких как концентрации реагентов, температура и время синтеза, время, прошедшее между добавлением реагентов.

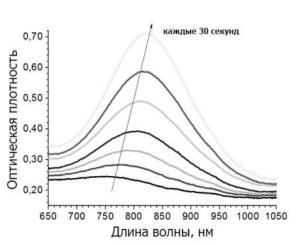
Известно и описано множество методов синтеза золотых наностержней, хотя кинетика их роста по-прежнему остается плохо изученной. В данной работе с помощью разработанного спектрального метода изучалась кинетика роста наностержней золота в режиме реального времени. Данный метод позволил исследовать временные зависимости смещения спектрального положения максимума плазмонного резонанса при изменении температуры, концентраций реагентов, времени синтеза.

Синтез наностержней проводили, следуя двухэтапной процедуре [2]. На первом этапе готовили раствор «зародышей». Данный раствор получали восстановлением золотохлористоводородной кислоты (ЗХВК) с помощью NaHB₄ в среде 0,1M ЦТАБ (цетилтриметиламмоний бромид). На втором этапе синтезировали непосредственно наностержни золота восстановлением ЗХВК с помощью аскорбиновой кислоты в среде 0,1M ЦТАБ в присутствии добавочных ионов (Ag⁺). Для данного этапа брали следующие объемы и концентрации (принимаемые за начальный стандарт): 10 мл 0,1M водного раствора ЦТАБ; 200 мкл 4мМ AgNO₃; 100 мкл 0,1M аскорбиновой кислоты; 500 мкл 10мМ раствора золотохлористоводородной кислоты и 100 мкл раствора зародышей, приготовленного на первом этапе.

Для изучения механизма роста варьировали количества нитрата серебра или аскорбиновой кислоты в растворе, в то время как остальные компоненты оставались постоянными. Кроме того, варьировали концентрацию ЦТАБ (0,01-0,1М) при сохранении объема и концентраций прочих реагентов.

Экспериментальная установка для измерений состояла из спектрометра QEPro (OceanOptics, USA), источника излучения, оптоволокна и кюветного отделения.

Для записи траектории роста наностержней золота, вторую стадию синтеза проводили непосредственно в измерительной кювете при одновременной съемке спектра. Усредненный из 10 измерений спектр пропускания измеряли через каждые 50 мс. Для различных используемых концентраций реагентов исследовали положение пика максимума поглощения от времени.



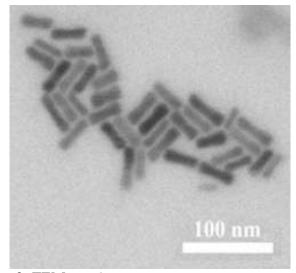


Рис. 1. Изменение оптической плотности в процессе синтеза HC золота

Рис. 2. ТЕМ-изображение полученных наностержней золота.

При исследовании концентрационной зависимости положения максимума золотых наностержней в спектре мы установили, что в течение времени синтеза длина волны максимума плазмонного резонанса сдвигается в инфракрасную область спектра до определенного значения. Затем максимум плазмонного резонанса сдвигается обратно в сторону синей области спектра (рис. 3).

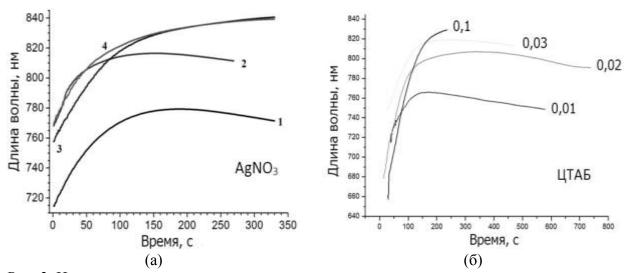


Рис. 3. Изменение положения максимума плазмонного резонанса во времени при различных значениях: (а) молярности $AgNO_3$ (мМ) для (1) - 0,4, (2) - 0,58, (3) - 0,94, (4) - 1,2; (б) – молярности ЦТАБ (М).

Спектральное измерение хода реакции роста кювете длиной 1 см возможно в течение первых 5-7 минут, до тех пор, пока оптическая плотность раствора не достигает 2. Траектория хода роста наностержней золота стабильно изменяется для всех концентраций исследуемых реагентов, а для концентрации нитрата серебра имеет предел насыщения.

Библиографический список

- 1. Дыкман Л.А., Богатырев В.А., Щеголев С.Ю., Хлебцов Н.Г. Золотые наночастицы: синтез, свойства, биомедицинское применение. // М.: Наука, 2008. 319с.
- 2. *NikoobakhtB., El-SayedM.A.* Preparationand Growth Mechanism of Gold Nanorods (NRs) Using Seed-Mediated Growth Method // Chem. Mater. 2003. V.15. P.1957-1962

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДНОЙ СВЯЗИ НА ИК СПЕКТРЫ ТРИФЕНИЛФОСФИТА

Л.М. Бабков¹, Н.А. Давыдова², И.В. Ивлиева¹, Д.С. Титоренко¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского ²Институт физики НАН Украины, г. Киев E-mail: irine09@yandex.ru

В статье представлены результаты исследований, цель которых состоит в обосновании положений о наличии в трифенилфосфите (ТФФ) комплексов, образованных слабой водородной связью. Исследования носили комплексный характер и основывались на методах квантовой химии и колебательной ИК спектроскопии (эксперимент, теория).

ИК спектры ТФФ измерены в различных фазовых состояниях (моноклинная, гексагональная ТК фазы, «глассиал», аморфное состояние, жидкость). Анализ измеренных спектров дан на основе молекулярного моделирования структуры и ИК спектров ТФФ с учетом влияния на них конформационных изменений и водородной связи. В моделировании использован метод B3LYP/6-31g(d), реализованный в программном пакете GAUSSIAN'03. ИК спектры рассчитаны в гармоническом приближении.

В работах [1, 2] установлена возможность реализации в ТФФ конформеров различных типов. Результаты проведенного моделирования стали основой для интерпретации его ИК спектров, измеренных при различных температурах и фазовых состояниях. Было установлено, что для полной интерпретации ИК спектров ТФФ учета конформационных изменений недостаточно. Анализ высокочастотной области спектра 3000—3100 см⁻¹ индуцировал предположение о наличии слабой водородной связи в образце. Ее учет, на наш взгляд, позволил бы детальнее описать структуру образца ТФФ и существенно дополнить интерпретацию его ИК спектра.

Рис.1 иллюстрирует влияние изменений конформации на ИК спектр ТФФ, измеренный в различных фазовых состояниях. На рисунке представлены области 715-740, 850-890, 1180-1220 см⁻¹, где конформационные изменения проявляются наиболее явно. В кристаллических модификациях преобладает конформер I, в состояниях "глассиал", стеклофазе и жидкости в образце реализуются все три конформера (I, II, III). В области 3000-3100 см⁻¹, как выяснилось,

изменение конформации практически не влияет на спектр, и не может объяснить структуру всей этой полосы.

Произведено моделирование структуры и ИК спектра димера ТФФ, образованного водородной связью за счет обобществления протона между атомами кислорода связи Р-О и углерода фенильного кольца (С-H...О). Учет водородной связи приводит к уменьшению частоты валентного колебания q(O...H) на $20~cm^{-1}$ и увеличению на порядок его интенсивности. Небольшой сдвиг указывает на слабый тип водородной связи (рассчитанная энергия ее составляет 1,3 ккал/моль). Длина водородного мостика С-H...О составила 2,961 Å, водородной связи O...H -1,870 Å, величина угла C-H...O - 176^{O} .

Анализ структуры и ИК спектров Н-комплексов показал, что наличие межмолекулярной Н-связи, существенным образом изменяет форму полосы в области 3000-3100 см⁻¹. Это изменение коррелирует с распределением интенсивностей и формы полосы в измеренных спектрах (кривая IV). Установлено также влияние водородной связи на ИКС в

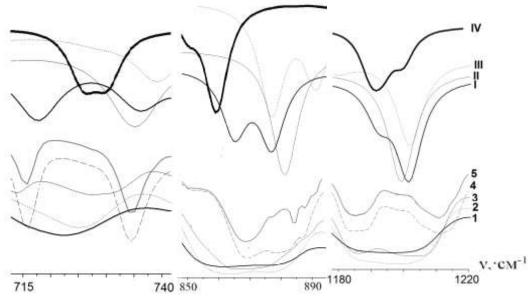


Рис.1. Измеренные (1 - жидкость, 2 - стекло, 3 - «глассиал», 4 - стабильная и 5 – метастабильная фазы) и рассчитанные ИК спектры конформеров I, II, III и H-комплекса (IV) ТФФ

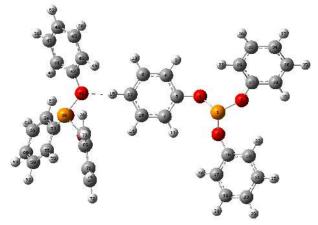


Рис.2. Н-комплекс ТФФ

областях 715-740, 850-890, 1180-1220 см⁻¹, рассмотренных выше (рис. 1, кривая IV). Это влияние менее значительно в твердокристаллических модификациях и возрастает в жидком и аморфном состояниях.

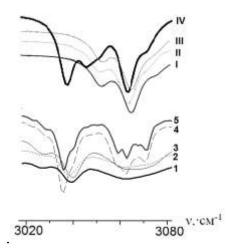


Рис.3. Теоретические спектры конформеров I, II, III и H-комплекса (IV) и экспериментальные спектры (1-жидкость, 2-стекло, 3-глассиал, 4-метастабильная фаза, 5-стабильная фаза)

Из анализа результатов моделирования и измеренных спектров можно сделать следующие выводы. В образце реализуются конформеры, различающиеся по длинам связей и углам фрагмента P(OC)₃. В гексагональной и моноклинной кристаллических модификациях преобладает конформер типа I. Конформеры объединены в Н-комплексы со слабой водородной связью С-Н...О. ИК спектры ТФФ, измеренные в стабильной и метастабильной фазах, в "глассиал", стеклофазе и жидкости являются суперпозицией спектров трёх наиболее вероятных спектрально различимых конформеров, образующих Н-комплексы.

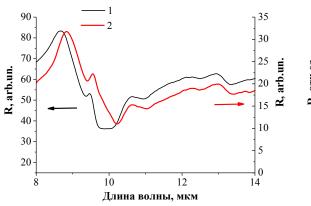
Библиографическийсписок

- 1. Babkov L.M., Baran J., Davydova N.A., Ivlieva I.V., Ponezha E.A., Reznichenko V.Ya. Infrared Spectra of Triphenyl Phosphite and Their Interpretation on the Basis of Quantum Chemistry Calculation// Ukr. J. Phys. 2016. V. 61, №6. P.471-477.
- 2. *Бабков Л.М., Давыдова Н.А., Ивлиева И.В.* ИК спектры трифенилфосфита и их интерпретация на основе молекулярного моделирования. // Изв. Сарат. ун-та. Новая сер. Сер. Физика. 2017. Т. 17, вып. 1. С.11-19.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИК СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ПЛЕНОК CdS-PbS ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ МОРФОЛОГИИ И ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ

М.И. Шишкин, А.Г. Роках Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: shishkin1mikhail@gmail.com

Полуметаллические свойства пленок твердых растворов CdS-PbS, полученных термическим распылением, ярко выражены в неотожженном состоянии, что в принципе не характерно для высокоомных монокристаллов CdS или пленок CdS-PbS, полученных химическим осаждением [1,2,3]. Исследование спектра оптического отражения в среднем инфракрасном диапазоне может стать эффективным способом определения поглощения излучения свободными носителями заряда в кристаллитах поликристаллических пленок до и после отжига (с разной степенью кристаллизации), как например, в [4]. Исследование плазменного резонанса обычно проводится на монокристаллах в связи с удобством использования для анализа спектра отражения табличных данных для монокристаллического состояния [5,6]. Для анализа спектров отражения поликристаллических пленок твердых растворов CdS-PbS (рис. 1) со сложной пространственной структурой приходится применять упрощения и допущения, которые с разной степенью погрешности влияют на соответствие экспериментальным данным [7,8]. Одним из таких упрощений является представление этих пленок с малым содержанием узкозонной фазы в качестве композитной среды в виде включений PbS в матрицу CdS [9], что наиболее оправданно после проведения отжига и рекристаллизации данных образцов, поскольку это способствует пространственному выделению узкозонной фазы.



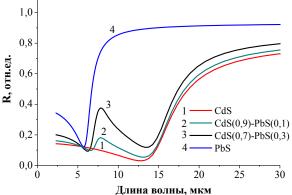


Рис. 1. Экспериментальный спектр отражения неотожженных (1) и отожженных (2) пленок CdS(0,9)-PbS(0,1), снятый на ИК Фурье спектрометре Nicolet 6700

Рис. 2. Рассчитанный спектр отражения пленок $Cd_{I-x}Pb_xS$ для x=0; 0,1; 0,3; 1 (в допущении непрерывного ряда твердых растворов) с учетом вклада плазменного резонанса на свободных носителях заряда

В таблице 1 представлены наиболее важные для моделирования вклада свободных носителей физические величины в CdS и PbS, в том числе те, которые напрямую определяют положение минимумов отражения — концентрации свободных носителей заряда.

Таблица 1

	$arepsilon_L$	<i>m</i> *	N, м ⁻³	$\omega_P, \mathrm{c}^{\text{-}1}$
CdS	5	0,2	$5*10^{24}$	$1,27*10^{14}$
PbS	18	0,1	$5*10^{25}$	$3*10^{14}$

На рис. 2 показаны рассчитанные спектры отражения пленок твердых растворов Cd_{1-x}Pb_xS с учетом вклада свободных носителей, параметром в которых выступает компонента х (х=0;0,1;0,3;1). Форма кривых претерпевает изменение при варьировании времени релаксации $\tau = m^* \mu / e$, которое определяет $\omega_{\scriptscriptstyle P} \tau$ - добротность плазменного резонанса. Подвижность основных носителей заряда в CdS, по этим расчетам, является подгоночным параметром и соответствует $280~\text{cm}^2/\text{B*c}$; подвижность в PbS $-350~\text{cm}^2/\text{B*c}$ (добротность PbS принята равной 6, а добротность CdS 4). Выбранная подвижность была меньше подвижности монокристаллов (для монокристаллов $CdS - 350 \text{ cm}^2/\text{B*c}$ и $700 \text{ cm}^2/\text{B*c}$ для PbS) [6,10]. Диэлектрическая проницаемость «решетки» ε_L соответствует высокочастотным значениям: вследствие дисперсии она существенно ниже, чем на нулевой частоте. Для расчета комплексной диэлектрической проницаемости пленки применяется соотношение Максвелла-Гарнетта. Сложность морфологии данной гетерогенной полупроводниковой структуры приводит к образованию многочисленных неоднородностей потенциального рельефа, соответствующих разной концентрации носителей заряда на границе широкозонной фазы и узкозонных включений. Электронно-микроскопическая фотография в режиме ЕВІС на рис. 3 наглядно показывает, что токи, наведенные электронным пучком, протекают преимущественно через мелкие и крупные кристаллиты (включения) на поверхности образца, которые изображены в левой части изображения, полученного в обратно рассеянных электронах.

ATTACL STATE OF THE STATE OF TH

Рис. 3. Участок поверхности отожженной пленки CdS(0,9)-PbS(0,1) снятый в обратно рассеянных электронах (слева) и тот же участок поверхности, снятый в режиме EBIC

Моделирование эффективной диэлектрической проницаемости пленки CdS-PbS может быть полезным при изучении электродинамических свойств этого вещества для длин волн излучения значительно больших чем расстояния между включениями PbS, которые в свою очередь обычно значительно превосходят размеры самих этих включений.

Библиографический список

- 1. *Кирьяшкина З.И., Роках А.Г., Кац Н.Б. и др.* Фотопроводящие пленки (типа CdS) //Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 1979. 192 с.
- 3. *Марков В.Ф., Форостяная Н.А., Ермаков А.Н., Маскаева Л.Н.* Синтез тонкослойных твердых растворов в системе CdS−PbS методом ионообменного замещения // Бутлеровские сообщения. 2011. Т.27. №16. С. 56-61.
- 4. *Лошкарева Н.Н., Сухоруков Ю.П. и др.* Прямое наблюдение разделения фаз в $La_{I-x}Ca_xMnO_3$ // Письма в ЖЭТФ.1998. Т. 68, В. 1., С. 89-92.
- 5. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников // М.: Наука, 1967. 263 с.
- 6. *Dixon J.R., Riedl H.R.* Optical dispersion of lead sulfide in the infrared // Physical review. V. 140, No 4A, 1965. A1283-A1291.
- 7. Роках А.Г., Биленко Д.И., Шишкин М.И., Скапцов А.А., Вениг С.Б., Матасов М.Д. Оптические спектры пленок CdS-PbS и возможность фотоэффекта в среднем инфракрасном диапазоне // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, № 12. С.1602-1606.
- 8. *Шишкин М.И., Вениг С.Б., Роках А.Г.* Плазменный резонанс в фотопроводящем композите CdS-PbS // Материалы XXIV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 2016. с. 129-131.
- 9. *Стецюра С.В., Маляр И.В., Вениг С.Б.* Технология и применение гетерогенных структур на основе сульфоселенидов кадмия. // Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 2013. 192 с.
- 10. *http://www.semiconductors.co.uk/propiivi5410.htm* Properties of the II-VI compound semiconductors. Обращение к ресурсу 10.03.2017.

2 ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СРЕДЕ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

В.Т. Ерофеенко Белорусский государственный университет, г. Минск E-mail: bsu erofeenko@tut.by

Исследование электромагнитных свойств композиционных материалов является одним из приоритетных направлений научных исследований. Композиты представляют собой неоднородные структуры, содержащие случайно распределенные частицы различной природы. Один из подходов математического моделирования таких материалов сводится к эквивалентной замене неоднородной среды эффективной однородной средой, с высокой точностью отражающей свойства реальной среды [1]. В представленных материалах аналитически строится система плоских электромагнитных полей, распространяющихся в средах с пространственной дисперсией.

1. Модели сред с пространственной дисперсией

Рассмотрим пространство R^3 с декартовой системой координат Oxyz, заполненное материальной средой с пространственной дисперсией. Для описания электромагнитных волн в таких средах используются итегродифференциальные модели сред [2, 3]. Комплексные амплитуды \vec{E}, \vec{H} монохроматических электромагнитных полей с временной зависимостью $\exp(-i\omega t)$ в среде подчиняются уравнениям

$$\operatorname{rot} \vec{H} = -i\omega \left(\varepsilon_{0} \vec{E} + \vec{P} \right), \quad \operatorname{rot} \vec{E} = i\omega \left(\mu_{0} \vec{H} + \vec{m} \right), \tag{1}$$

где $\epsilon_{_0}$, $\mu_{_0}$ –электрическая и магнитная постоянные, $\omega-$ круговая частота. Электрическая и магнитная поляризации определяются объемными интегралами

$$\vec{P}(\vec{r}) = \frac{\varepsilon_0}{V_1} \int_{D_{1M}} K_1(|\vec{r} - \vec{r}_0|/R_1) \vec{E}(\vec{r}_0) d\vec{r}_0,$$

$$\vec{m}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{V_2} \int_{D_{1M}} K_2(|\vec{r} - \vec{r}_0|/R_2) \vec{H}(\vec{r}_0) d\vec{r}_0,$$
(2)

где $D_{_{jM}}=\left\{ \vec{r}_{_{0}},\left|\vec{r}-\vec{r}_{_{0}}\right|< R_{_{j}} \right\}$ —шар радиуса $R_{_{j}}$, описанной вокруг точки M(x,y,z), точ-ки M(x,y,z), точ-

ка $M(x_0, y_0, z_0) \in D_{jM}$, $\vec{r} = (x, y, z)$, $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$, $V_j = \frac{4}{3}\pi R_j^3$, $K_j(p)$ — заданные функции.

Компоненты векторов $\vec{E}(M)$, $\vec{H}(M)$ разложим в ряды Тейлора в окрестности точки M. Для разработки более простой математической модели ограничимся слагаемыми рядов до второго порядка включительно, пренебрегая величинами третьего порядка малости. Такое допущение приемлемо в случае, когда длина электромагнитной волны значительно больше размеров частиц композита с пространственной дисперсией [2]. После подстановки разложений в (2) уравнения (1) преобразуются в уравнения с производными второго порядка.

$$\operatorname{rot} \vec{H} = -i\omega \left(\varepsilon_{\Pi} \vec{E} + P \Delta \vec{E} \right), \quad \operatorname{rot} \vec{E} = i\omega \left(\mu_{\Pi} \vec{H} + m \Delta \vec{H} \right), \tag{3}$$

где
$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$
 — оператор Лапласа,

$$\varepsilon_{II} = \varepsilon_0 \left(1 + 3 \int_0^1 K_1(p) p^2 dp \right), \ \mu_{II} = \mu_0 \left(1 + 3 \int_0^1 K_2(p) p^2 dp \right),$$

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon_0 R_1^2 \int_0^1 K_1(p) p^4 dp, m = \frac{1}{2} \mu_0 R_2^2 \int_0^1 K_2(p) p^4 dp.$$

Уравнения (3) являются дифференциальной моделью, описывающей распространение электромагнитных волн в среде с пространственной дисперсией.

2. Электромагнитные волны в среде с пространственной дисперсией

Представляет научный интерес нахождение аналитических решений системы уравнений (3). В предлагаемой работе получена полная система плоских электромагнитных полей, распространяющихся в среде. Для построения электрических и магнитных полей использованы базисные волновые поля [3, с.96].

$$\vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r};\alpha_1,\alpha_2;k) = \frac{i}{\lambda} (\alpha_2 \vec{e}_x - \alpha_1 \vec{e}_y) \Phi(x,y) \exp(\mp vz),$$

$$\vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r};\alpha_1,\alpha_2;k) = \frac{i}{k} (\mp \frac{iv}{\lambda} (\alpha_1 \vec{e}_x + \alpha_2 \vec{e}_y) + \lambda \vec{e}_z) \Phi(x,y) \exp(\mp vz),$$

где α_1, α_2, k – произвольные

комплексные

постоянные,

$$\lambda = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}$$
, $v = \sqrt{\lambda^2 - k^2}$, $\Phi(x, y) = \exp(i\alpha_1 x + i\alpha_2 y)$.

Получены следующие группы плоских полей.

$$\begin{split} \vec{E}_{1}^{(\mp)} &= E_{0} \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_{1}, \alpha_{2}; k_{+}), \quad \vec{H}_{1}^{(\mp)} = E_{0} \gamma_{+} \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_{1}, \alpha_{2}; k_{+}); \\ \vec{E}_{2}^{(\mp)} &= E_{0} \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_{1}, \alpha_{2}; k_{+}), \quad \vec{H}_{2}^{(\mp)} = E_{0} \gamma_{+} \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_{1}, \alpha_{2}; k_{+}); \\ \vec{E}_{3}^{(\mp)} &= E_{0} \vec{W}_{-}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_{1}, \alpha_{2}; k_{-}), \quad \vec{H}_{3}^{(\mp)} = E_{0} \gamma_{-} \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_{1}, \alpha_{2}; k_{-}); \end{split} \tag{4}$$

$$\vec{E}_{4}^{(\mp)} = E_{0} \vec{W}^{(\mp 2)} (\vec{r}; \alpha_{1}, \alpha_{2}; k_{-}), \quad \vec{H}_{4}^{(\mp)} = E_{0} \gamma_{-} \vec{W}^{(\mp 1)} (\vec{r}; \alpha_{1}, \alpha_{2}; k_{-}),$$

где $E_{\scriptscriptstyle 0}$ – постоянная амплитуда, $\, \mathrm{B/m} \, ,$

$$\gamma_{\pm} = \left[\frac{1}{2m\mu_{\Pi}} \left(-B \pm \sqrt{B^2 - 4\varepsilon_{\Pi}\mu_{\Pi}mP} \right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$k_{\pm} = i\omega\gamma_{\pm} \frac{\mu_{\Pi}P - \varepsilon_{\Pi}m}{m\gamma_{\pm}^2 + P}, \quad B = \varepsilon_{\Pi}m + \mu_{\Pi}P + \omega^2(\varepsilon_{\Pi}m - \mu_{\Pi}P)^2.$$

Поля (4) удовлетворяют уравнениям (3) и распространяются в среде с пространственной дисперсией в прямом и обратном направлениях.

Библиографический список

- 1. Ерофеенко В.Т., Бондаренко В.Ф. Вычисление эффективных электродинамических параметров композита с частицами из специальных материалов // Информатика. 2015. № 2. С. 55-62.
- 2. Виноградов A.П. Электродинамика композитных материалов. // М.: Эдиториал УРСС, 2001. 206 с.
- 3. Ерофеенко В.Т., Козловская И.С. Аналитическое моделирование в электродинамике. // М.:ДК Либроком, 2014. 304 с.

МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В.И. Демидчик, Р.В. Корнев Белорусский государственный университет, г. Минск E-mail: demidvi@bsu.by

Исследования углеродных нанотрубок (УНТ) и композитных материалов на их основе представляют значительный практический интерес. Перспективным является применение УНТ в качестве антенных систем в различных областях. С другой стороны УНТ применяются при разработке материалов для широкодиапазонных поглотителей электромагнитных волн. УНТ предоставляют возможности для создания материалов с регулируемыми в широком диапазоне значений материальными параметрами. Композитные материалы на основе УНТ могут быть использованы в устройствах микроволнового диапазона, например в качестве частотно-избирательных или поглощающих структур, для успешного применения которых также необходимо знание их рассеивающих свойств. При этом, упомянутые структуры характеризуются достаточной сложностью их геометрии (местоположением и произвольной ориентацией УНТ), и, как результат, сложностью их электродинамических свойств.

Исследованию электродинамических характеристик УНТ посвящено значительное количество работ (см., например [1–4]), при этом в большинстве из них анализ электродинамических свойств проводится с использованием интегрального уравнения Халлена [1], либо интегрального уравнения Леонтовича – Левина [2]). Такой подход позволяет рассматривать либо одиночные прямолинейные УНТ как вибраторы, либо структуры, состоящие из таких вибраторов.

При исследовании структур из произвольно ориентированных УНТ, которые, кроме того, могут иметь сложную конфигурацию, а также при решении задач рассеяния электромагнитных волн на УНТ более целесообразно для построения математической модели использовать уравнение Поклингтона [4]. Вместе с тем, и в случае применения уравнения Поклингтона, авторы [4] ограничиваются анализом прямолинейных структур на основе УНТ.

В ряде работ отмечается, что при различных способах синтеза УНТ наряду с прямолинейными трубками присутствует заметное количество УНТ других морфологий. К примеру, при использовании каталитического крекинга ацетилена кроме прямолинейных присутствует заметное количество изогнутых и УНТ в виде спиралей различного шага и диаметра [5].

Учесть влияние геометрии на электродинамические характеристики УНТ и материалов на их основе позволяет использование ИУ Поклингтона для произвольной геометрии, которое имеет вид [6]:

$$-j\frac{k}{Z_{0}} \cdot I(s) \cdot Z(s) + \int_{L} I(s') \cdot \left[k^{2}G(s,s') \cdot \vec{s} \cdot \vec{s} - \frac{\vec{r}(s,s')}{\partial s \partial s'} \right] ds' = -j\frac{k}{Z_{0}} \cdot E_{\tau}(s),$$

$$K(s,s') = -G(s,s') \left\{ \left(\frac{3ikr + 3 - k^{2}r^{2}}{r^{4}} \right) AB + \left(\frac{k^{2}r^{2} - 1 - ikr}{r^{2}} \right) C \right\},$$

$$G(s,s') = \frac{\exp(-ikr)}{4\pi r},$$

$$A = (x - x') \frac{\partial x'}{\partial s'} + (y - y') \frac{\partial y'}{\partial s'} + (z - z') \frac{\partial z'}{\partial s'},$$

$$B = (x - x') \frac{\partial x}{\partial s} + (y - y') \frac{\partial y}{\partial s} + (z - z') \frac{\partial z}{\partial s},$$

$$C = \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial x'}{\partial s'} + \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial y'}{\partial s'} + \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial z'}{\partial s'}, r = \sqrt{(x - x')^{2} + (y - y')^{2} + (z - z')^{2} + a_{0}^{2}},$$

гдеI(s') — искомая функция распределения тока, L — длина УНТ (область интегрирования), $2a_0$ — диаметр УНТ, s, s' — криволинейные координаты, отсчитываемые вдоль УНТ, \vec{s}^0 , \vec{s}^0 — орты, касательные к УНТ, $E_{\tau}(s)$ — касательная к поверхности УНТ составляющая поля источника возбуждения, Z_0 — волновое сопротивление свободного пространства (Z_0 =120 π), k — волновое число (k=2 π / λ), Z(s) — поверхностный импеданс УНТ, который в соответствии с [1] можно представить в виде:

$$Z(s) = \frac{1}{2\pi a\sigma} = \frac{j\pi^2 ha(\omega - jv)}{2\pi a 2e^2 V_F} = \frac{jh(\omega - jv)}{8e^2 V_F},$$
 (2)

где V_F - скорость Ферми, $^{\mathsf{V}}$ - частота релаксации.

В качестве тестовых расчетов решалась задача о возбуждении УНТ в виде вибратора длиной L= 20мкм и радиусом 2,712 нм плоской электромагнитной волной и сосредоточенным источником, при этом $V_F = 9,71\cdot 10^5\,i$ / $\~nå\^e$, $v = 0,33\cdot 10^{12}\,\~A\~o$. На рис. 1 приведены нормированные данные о максимальном значении амплитуды тока УНТ прямолинейной геометрии длиной 20 мкм при возбуждении плоской электромагнитной волной в интервале частот. Сравнение с результатами из [7] позволяет сделать вывод о достоверности получаемых данных.

На рис. 2 приведены результаты расчета токораспределения, возбуждаемой сосредоточенным источником УНТ в виде прямолинейного вибратора, кривая 1; УНТ в виде полукольца с радиусом 12,8 мкм, кривая 2; УНТ в виде витка спирали с радиусом 6,4 мкм и углом подъема 6^0 , кривая 3. Во всех трех случаях длина УНТ — 20 мкм. Для прямолинейной УНТ результаты практически совпадают с данными из [1], для УНТ изогнутой геометрии резонансная частота уменьшается, что говорит о появлении дополнительной индуктивности за счет спиральной геометрии УНТ.

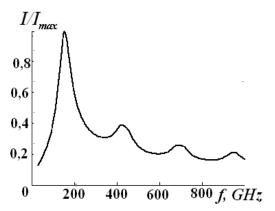


Рис.1. Нормированная зависимость максимального значения амплитуды тока от частоты для прямолинейной УНТ длиной 20 мкм при возбуждении плоской электромагнитной волной.

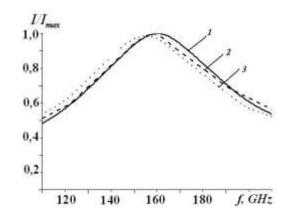


Рис.2. Нормированная зависимость максимального значения амплитуды тока от частоты для: 1 - прямолинейной УНТ, 2 – УНТ в виде полукольца, 3 –УНТ в виде витка спирали. Возбуждение сосредоточенным источником.

Предложенный алгоритм позволяет в рамках антенного приближения проводить расчет токораспределения УНТ произвольной геометрии и рассчитывать, в дальнейшем, материальные параметры композита, содержащего подобные нанотрубки.

Библиографический список

- 1. *Hanson G.W.* Fundamental Transmitting Properties of Carbon Nanotube Antennas // IEEE Transactions on antennas and propagation.2005.Vol.53. №. 11.P. 3426-3435.
- 2. *Maksimenko S.A.*, *Slepian G.Y.*, *Lakhtakia A. et al.*Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamic conductivity, impedance boundary conditions, and surface wave propagation // Phys. Rev. B.1999. Vol. 60.P. 17136-17149.
- 3. *Maksimenko S. A., Slepyan G. Y. et al.* Electromagnetic waves in carbon nanostructures // Carbon Nanotubes and Related Structures. Ed.: V. Blank and B. Kulnitskiy, Research Signpost Publisher.2008.P. 147-187.
- 4. *Лучанинов А.И.*, *Медведев Е.А.*, *Уайд С.Р.* Использование уравнения Поклингтона для анализа антенн из углеродных нанотрубок // Радиотехника. 2013. Вып. 174. С.112-121.
- 5. *Елецкий А.В.* Углеродные нанотрубки // Успехи физических наук. 1997. Т.169. № 9. С.945-972.
- 6. Демидчик В.И., Рунов А.В., Калашников Н.В. Алгоритм расчета токораспределения электрически длинных криволинейных проводников // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. 1983. Т.26. № 3. С. 82-84.
- 7. *Hao Jin., Hanson G.W.* Electromagnetic scattering from finite-length metallic carbon nanotubes in the lower IR bands // Physical Review. B74, 035119, 2006.

ЭФФЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ

Н.Е. Нефедкин², Е.С. Андрианов², А.А. Пухов, А.П. Виноградов

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Духова

Московский физико-технический институт (государственный университет)

3 Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН

Е-mail: nefedkin@phystech.edu

Когерентная динамика открытых систем различной физической природы в последнее время привлекает всё большее внимание. Прежде всего, стоит упомянуть открытые квантовые системы, кубиты, химические и биологические системы [1]. Одним из основных свойств открытых систем является высокий уровень потерь и шумов, которые существенно влияют на динамику системы.

При взаимодействии с резервуаром наряду с изменением энергии системы всегда присутствует случайное воздействие на систему. Если у системы существует стационарное состояние, то имеет место флуктуационнодиссипационная теорема (ФДТ) [2], которая связывает отклик линейной системы на внешнее воздействие со спектральными характеристиками этой системы. Например, в случае линейного осциллятора выполняется равенство скорости диссипации энергии и спектра флуктуаций вблизи стационарного состояния. Стоит, однако, отметить, что динамика фазы в присутствии шума достаточно нетривиальна. В последнее время влияние шума на динамику фазы интенсивно изучалось в задачах об эффекте Джозефсона [3].

В данной работе исследуются фазовые флуктуации диссипативного осциллятора, взаимодействующего с внешней силой. Установлено, что суще-

ствуют определённые значения амплитуды и частоты внешнего поля, которые разделяют два различных режима динамики системы. Характерной величиной, которая разделяет данные режимы, является автокорреляционная функция косинуса фазы. В первом режиме она затухает на больших временах к некоторому отличному от нуля стационарному значению. Во втором режиме имеют место незатухающие осцилляции автокоррелятора косинуса фазы. На основе уравнения Адлера для фазы показано, что переход от первого режима ко второму происходит тогда, когда эффективный потенциал для фазы становится немонотонной функцией.

Библиографический список

- 1. Ingarden R.S., Kossakowski A., Ohya M. Information dynamics and open systems: classical and quantum approach. // Springer Science & Business Media, 2013.
- 2. *Marconi U. M. B. et al.* Fluctuation–dissipation: response theory in statistical physics //Physics reports. 2008. V. 461. P. 111-195.
- 3. Coffey W. T., Dejardin J. L., Kalmykov Y. P. Nonlinear impedance of a microwave-driven Josephson junction with noise //Physical Review B. 2000. V. 62. P. 3480.

МОДУЛЯЦИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРОХОДЯЩЕГО ЧЕРЕЗ МАГНИТНУЮ ЖИДКОСТЬ С НАНОТРУБКАМИ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ НАПРАВЛЕНИЕМ

Т.С. Бочкова, В.Н. Гаврилин, С.В. Игонин, Д.А. Усанов, А.Э. Постельга Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: usanovda@info.sgu.ru, tatjana.vedyaeva@yandex.ru

Управление светом в результате воздействия магнитного поля на взаимодействующую с ним среду является одним из методов модуляции его интенсивности и поляризации [1,2]. В тонких пленках плазмонного фотонного кристалла с нанесенными массивами нанопроволок из золота достигалась глубина модуляции оптического излучения 24%.

Авторами [3,4] наблюдалось анизотропное рассеяние линейно поляризованного света на тонком слое магнитной жидкости, помещенном в магнитное поле, ориентированное вдоль границ плоского слоя, для различной ориентации вектора напряженности магнитного поля.

В [5] показано, что в магнитном поле электропроводность композита из магнитной жидкости и нанотрубок увеличивается вдоль направления приложенного магнитного поля. Это обусловлено образованием каналов проводимости с участием нанотрубок, ориентированных вдоль вектора магнитной индукции.

В [6] описано влияние концентрации нанотрубок на прохождение поляризованного лазерного излучения с длиной волны 460 nm через суспензию магнитной жидкости с нанотрубками при приложении внешнего однородного магнитного поля. Возникающий поляризационный эффект усиливался с ростом концентрации нанотрубок и величины внешнего магнитного поля.

В данной работе исследовалась возможность модуляции интенсивности поляризованного излучения лазера при прохождении через магнитную жидкость, содержащую, наряду с магнитными частицами, нанотрубки серии «Таунит»,при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением.В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер на квантово-размерных структурах с длиной волны 650 nm.

Изменяя направление действующего на магнитную жидкость внешнего магнитного поля, можно модулировать прошедшую через нее мощность лазерного излучения. При введении в магнитную жидкость нанотрубок наблюдается их агломерация вдоль нитевидных агломератов из ферритовых наночастиц, в результате чего увеличивается результирующая толщина и проводимость нитевидных агломератов, представляющих собой композиты из ферритовых наночастиц и нанотрубок. Следовательно, должна существенно увеличиваться глубина модуляции прошедшего излучения.

Используемая в эксперименте магнитная жидкость на основе керосина, стабилизированная олеиновой кислотой, имела следующие параметры: средний диаметр магнетитовых частиц d=5 nm (частицы были получены химическим путем), объёмная доля твёрдой фазы $\phi=0.1$. Магнитная жидкость была синтезирована способом, аналогичным описанному в [7].

В зависимости от угла поворота лазера изменялась интенсивность прошедшего через ячейку лазерного излучения вследствие изменения ориентации электрической компоненты лазерного излучения относительно нитей, образованных ферромагнитными частицами и нанотрубками.

На рис.1 приведена зависимость интенсивности прошедшего излучения, регистрируемого фотодиодом, от угла α между вектором электрической компоненты лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля.

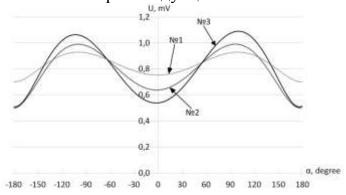


Рис. 1. Зависимость напряжения на фотодиоде от угла между вектором электрического поля лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля для суспензий с различной концентрацией нанотрубок (№1 — магнитная жидкость без нанотрубок, №2 — магнитная жидкость с нанотрубками с концентрацией 10 g/l, №3 — с концентрацией нанотрубок 40 g/l).

Глубина модуляции составила 22% для магнитной жидкости без нанотрубок; 37 % для суспензии с концентрацией нанотрубок 10 g/l и 54 % для суспензии с концентрацией нанотрубок 40 g/l.

Для оценки инерционных свойств полученных суспензий в изменяющемся магнитном поле была определена граничная частота, при которой наблюдалось изменение оптических свойств композита.

Используя дискретное преобразование Фурье, были построены спектры прохождения для нескольких частот внешнего переменного магнитного поля. По каждому спектру был рассчитан коэффициент Ω, равный отношению амплитуды спектральной составляющей на частоте внешнего магнитного поля к уровню шумов. На рис. 2 изображена зависимость коэффициента Ω для образца №3 с концентрацией нанотрубок 40 g/l от частоты внешнего переменного магнитного поля. Для всех образцов значение граничной частоты, выше которой спектральная составляющая на частоте внешнего магнитного поля становится неразличима от уровня шумов, составило 117 Hz.

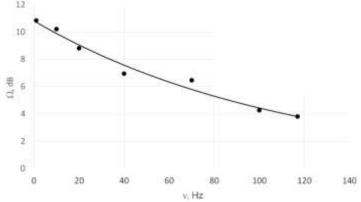


Рис. 2. Спектр отношения величины амплитуды спектральной составляющей лазерного излучения, прошедшего через образец №3 с концентрацией нанотрубок 40 g/l, соответствующей частоте внешнего переменного магнитного поля, к уровню шума.

Таким образом, показана возможность модуляции интенсивности поляризованного оптического излучения при прохождении через магнитную жидкость и суспензию магнитной жидкости с нанотрубками в магнитном поле. В последнем случае достигается глубина модуляции свыше 50%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. Belotelov V.I.,.Kreilkamp L.E., Akimov I.A., Kalish A.N., Bykov D.A., Kasture S.,. YallapragadaV.J., Achanta Venu Gopal, Grishin A.M., Khartsev S.I., M. Nur-E-Alam, VasilievM., Doskolovich L.L., Yakovlev D.R., K. Alameh, Zvezdin A.K.&M. Bayer// NATURE COMMUNICATIONS, DOI: 10.1038/ncomms3128.
- 2. *Jessie Yao Chin, Tobias Steinle, Thomas Wehlus, Daniel Dregely, Thomas Weiss, Vladimir I. Belotelov. //* NATURE COMMUNICATIONS, DOI: 10.1038/ncomms2609.

- 3. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Ермолаев С.А.*// Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 3. С. 64-67.
- 4. *Скрипаль А.В., Усанов Д.А.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 17.
- 5. *Pavlova A.A.,Dotsenko V.S., Suslyaev V.I.* // 25-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 6—12 сентября 2015 г., Севастополь, Крым, Россия: КрыМиКо 2015. -Севастополь, 2015. т.Т. 2, секц. 8/1: Контроль и управление в технологических процессах. С. 964—965.
- 6. *C. Vales-Prinzon, J.J. Alvarado-Gil, R. Medina-Esquivel, P. Martinez-Tores.* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 369, 114-121 (2014).
- 7. V. Berejnov, Yu. Raikher, V. Cabuil, J.-C. Bacri, R. Perzynski // JOURNAL OF COLLOID AND INTERFACE SCIENCE 199, 215–217 (1998).

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ И ГИГАНТСКОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ НА НАНОЧАСТИЦАХ ЗОЛОТА В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

С.Д Бондаренко¹, Д.Н. Браташов¹, Н.А. Бурмистрова¹, А.А. Шувалов^{1,2}, А.А. Чиброва^{1,2}, Б.Н. Хлебцов^{1,3}, Ю.С. Скибина^{1,2}, И.Ю. Горячева¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского ²НПП Наноструктурная технология стекла, г. Саратов ³Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, г. Саратов E-mail: bondsd90@gmail.com

Благодаря уникальным оптическим свойствам (устойчивости к электромагнитным помехам, короткому времени отклика) фотонно-кристаллические волноводы с полой сердцевиной (ФКВ ПС) являются перспективной основой при создании оптических элементов биосенсоров[1]. Внедрение ФКВ в спектроскопию комбинационного рассеяния (КР) и гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) позволяет достигать низких пределов обнаружения и может быть адаптировано к анализу и детектированию широкого круга биологических и химических объектов.

В работе использовали 2 типа ФКВ ПС с различным положением фотонных запрещенных зон (ФЗЗ) (рис.1). Исследование спектральных характеристик ФКВ ПС проводили на анализаторе AvaSpec-HS2048XL с лампой Torlabssl5600, спектры КР и ГКР измеряли на установке RenishawinVia (лазеры 532 и 785 нм, мощность до 30 мВт).

Изображение поперечного сечения образца





Рис. 1. ФКВ ПС различной структуры.

Модификация внутренней поверхности ФКВ ПС включала стадии активации поверхности перекисно-аммиачным буфером, нанесения полимерного слоя и наночастиц золота. Полимерные пленки полиэтиленимина (ПЭИ) и поливинилпиридина (ПВП) на внутренней поверхности ФКВ ПС формировали пропусканием спиртовых растворов (2 мг/мл). В работе использовали золотые наночастицы двух видов («клетки», 50 нм [2] и нанозвезды,70 нм [3]).

Сравнение спектров пропускания ФКВ ПС до и после модификации показывает, что нанесение композитного покрытия полимер/золотые наночастицы незначительно сдвигает положение ФЗЗ (Рис. 2).Спектр ГКР родамина-Б, полученный при использовании ФКВ ПС (I) с положением ФЗЗ в области используемого лазера (785 нм) (рис.3) демонстрирует значительный фактор усиления основных линий, что позволяет идентифицировать вещество и фон от стеклянных обкладок ФКВ.

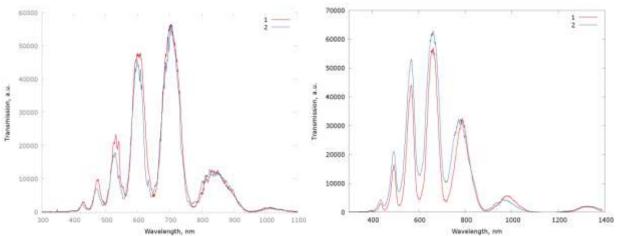


Рис. 2. Спектры пропускания ФКВ различной структуры до (1) и после (2) нанесения покрытия

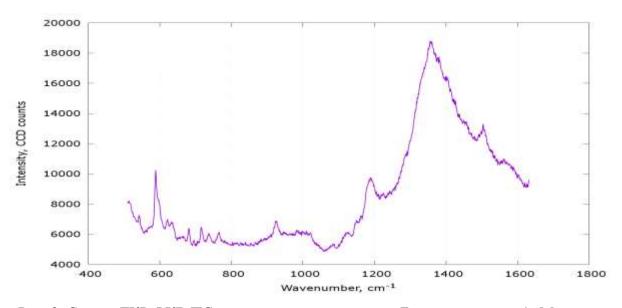


Рис. 3. Спектр ГКР ФКВ ПС, заполненного родамином-Б в концентрации1мМ, лазер с длиной волны 785 нм, мощность 3 мВт

ФКВ ПС (II с ФЗЗ близким к длинам волн лазеров показали незначительное усиление сигнала КР. При этом интенсивность сигнала КР сильно зависит от эффективности согласования числовой апертуры и точки фокусировки пучка света и апертуры входного сечения ФКВ ПС.

Спектр КР образца крови при использовании ФКВ ПС с ФЗЗ отличными от длин волн используемых лазеров демонстрируют возможность значительного увеличения сигнала при небольшой мощности лазера 532 нм (рис.4). В то же время при использовании лазера 785 нм происходит меньшее усилении сигнала плазмонными частицами внутри волновода.

В ходе работы изучено влияние структуры ФКВ ПС с нанесенным на внутреннюю поверхность слоем золотых наночастиц на спектры КР и ГКР родамина Б и крови человека. Показано, что перекрывание ФЗЗ ФКВ с длиной лазерного возбуждения уменьшает сигнал КР крови. При использовании родамина Б значительный фактор усиления позволил идентифицировать вещество и фон от стеклянных обкладок ФКВ.

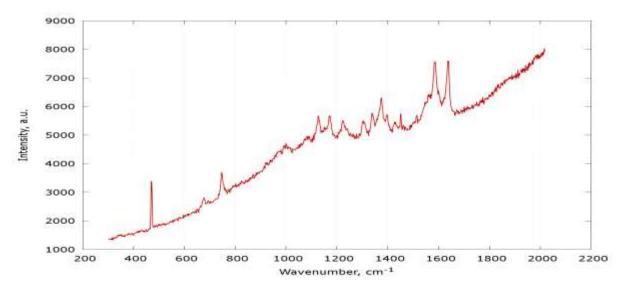


Рис. 4. Спектр КР образца крови с антикоагулянтом в оптимизированных ФКВ, лазер с длиной волны 532 нм, мощность 0,3 мВт, объектив 5х с апертурой 0,12.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 14-13-00229).

Библиографический список

- 1. *Malinin A.V., Skibina Y S., Tuchin V V., Chainikov M.V., Beloglazov V.I., Silokhin I.Y., Dol-mashkin A.A.* The Use of Hollow-Core Photonic Crystal Fibres as Biological Sensors // Quantum Electronics. 2011. Vol. 41. P. 302-307.
- 2. *Khlebtsov B.N., Khanadeev V.A., Maksimova I.L., Terentyuk G.S., Khlebtsov N.G.* Silver nanocubes and gold nanocages: Fabrication and optical and photothermal properties // Nanotechnol Russia. 2010. Vol. 5. P. 454-468.
- 3. *Khlebtsov B.N., Khanadeev V.A.,Panfilova E.V., Khlebtsov N.G.* Improved size-tunable synthesis and SERS properties of Au nanostars // Journal of Nanoparticle Research, 2014, Vol. 16, No. 10, p. 2623.

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ПЛАЗМОНЫ ВДОЛЬ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

M.В. Давидович 1,2

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского ² Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН E-mail: davidovichmv@info.sgu.ru

В последнее время большое внимание уделяется метаповерхностям (МП) и плазмон-поляритонам (ПП) вдоль них [1-7], поскольку структуры с поверхностными плазмонами (ПП) имеют весьма широкие сферы для приложений [8-14]. Цель работы – рассмотрение методов расчета свойств поляритонов вдоль МП и их дифракции на неоднородностях на основе функций Грина. Считаем, что МП представляет собой некий тонкий слой толщины h определенным образом сконфигурированного проводящего или магнито-диэлектрического материала на некой подложке (основе). Предполагаем также, что толщина поперечной конфигурации слоя много меньше длины волны ($h << \lambda$), поэтому его можно считать двумерной структурой, описываемой тензорной поверхностной (двумерной) проводимостью $\hat{\sigma}$, методы получения которой будут рассмотрены далее. В случае металлической и полупроводниковой пленки, а также графенового листа такую двумерную структуру называют двумерным электронным газом. В работе использован метод тензорных функций Грина электродинамики [15] для анализа ПП на МП сложной конфигурации. При линейном отклике в случае проводящего слоя, имеющего сложную трехмерную структуру, вводим объемную проводимость γ , связывающую объемную плотность тока и электрическое поле $J = \gamma E$. Это может быть проводимость металла, из которого выполнена металлическая пленка с двумерной структурой (в виде отверстий, щелей, выступов и т.п.) Интересны двумерно-периодические (2DP) структуры с периодами $d_x, d_y << \lambda$ вдоль осей. Для них методами гомогенизации вводится эффективный тензор поверхностной проводимости $\hat{\sigma}$. Если пленка диэлектриследует рассматривать плотность тока ee $\mathbf{J}_p = i\omega\varepsilon_0(\varepsilon-1)\mathbf{E}$, поэтому формально вводим объемную проводимость диэлектрика $\gamma_d = i\omega\varepsilon_0(\varepsilon-1)$. Аналогично для магнетика (например, тонкой ферритовой пленки) $\mathbf{J}_m = i\omega\mu_0(\hat{\mu} - \hat{I})\mathbf{H}$, и $\hat{\gamma}_m = i\omega\mu_0(\hat{\mu} - \hat{I})$. Здесь уже $\hat{\mu}$ — тензор магнитной проницаемости в постоянном магнитном поле, \hat{I} – единичный тензор. Формальный подход с использованием поверхностных проводимостей годится и для непроводящих на постоянном токе пленок. Пленка может лежать на поверхности подложки с диэлектрической проницаемостью (ДП) $\tilde{\varepsilon}$, причем подложка может быть как бесконечной толщины (полупространство), так и конечной толщины t, в том числе структурированной (состоящей из нескольких слоев или даже периодически расположенных слоев). Пусть ось z направлена перпендикулярно $M\Pi$ с границей при z = 0. Тогда током в направлении z можно пренебречь и ввести поверхностную плотность тока \mathbf{J}_s : $\mathbf{J}(x,y,z) = \mathbf{J}_s(x,y)\delta(z)$, при этом для однородной (сплошной) пленки $\sigma = \not m$. Поверхностная плотность тока приводит к замене объемных интегралов от плотности тока \mathbf{J} на поверхностные от \mathbf{J}_s . Поверхностная проводимость вводится как предел. Для графена в рамках подхода Кубо методом интегрирования вблизи точек Дирака в ряде работ получена скалярная проводимость, зависящая от температуры T, концентрации примесей (химического потенциала μ_c) и имеющая неисчезающий при T=0 и $\mu_c=0$ квантовый член $e^2/(2\hbar)$ [16–21]. Графен обладает тензорной проводимостью, которая в [21] получена в модели Бхатнагара-Гросса-Крука.

В работе рассчитаны ПП вдоль МП с графеновыми, металлическими и диэлектрическими структурами, а также ПП в тонких пленках [22]. Графен учитывался в рамках формализма Кубо-Гринвуда [16–21]. На рис. 1 приведена дисперсия Н-ПП на МП в виде слоя 50 нм, допированного медными шариками радиуса r. Кривая 1 — недопированный слой; кривые 2 — четыре периода с r = 8.33 нм на толщину слоя; кривые 3 — четыре периода с r = 6.25 нм на толщину слоя. Символ В означает обратную волну.

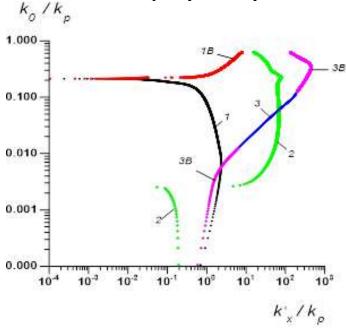


Рис. 1. Дисперсия H-поляритона на метаповерхности в виде диэлектрического слоя толщины 50 нм с ДП $\widetilde{\varepsilon}=6$ с периодическим допированием, расположенным на металлическом полупространстве

Обратный плазмон (ОП) имеет место при $k'_x k''_x < 0$ (рис. 2), т.е. когда произведение коэффициента фазы и затухания отрицательно. В этом случае движения фазы противоположно направлению вектора Пойнтинга (движению энергии). Диссипативным ОП не обязательно соответствует отрицательная групповая скорость (аномальная отрицательная дисперсия), что иллюстрирует рис. 1.

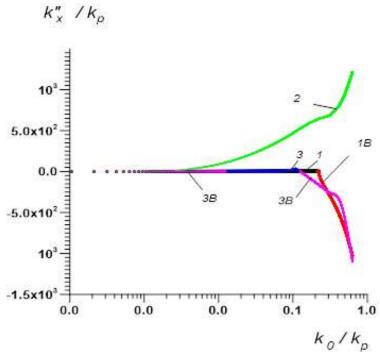


Рис. 2. Нормированные потери Н-поляритона, соответствующие рис. 1

Библиографический список

- 1. Yu N., Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces // Nat. Mater. 2014. V. 13. № 2. P. 139–150.
- 2. Li Z., Yao K., Xia F., Shen S., Tian J., Liu Y. Graphene plasmonic metasurfaces to steer infrared light // Scientific Rep. 2015. V. 5. P. 12423(5).
- 3. *Lu F.*, *Liu B.*, *Shen S.* Infrared wave front control based on graphene metasurfaces // Adv. Opt. Mater.2014. V. 2. №8. P. 794–799.
- 4. *Kildishev A.V., Boltasseva A., Shalaev, V.M.* Planar photonics with metasurfaces // 2013. V. 339 (6125) P. 1232009.
- 5. Yao, K., Liu, Y. Plasmonic Metamaterials // Nanotech. Rev. 2014. V. 3. P. 177-210.
- 6. Sun, S., He Q., Xiao S., Xu. Q, Li X., Zhou L. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves // 2012. V. 11. №5. P. 426–431.
- 7. *Liu, Y., Zhang, X.* Metasurfaces for manipulating surface plasmons // Appl. Phys. Lett.2013. V. 103. P. 141101-5.
- 8. *Yin X., Ye Z., Rho J., Wang Y., Zhang, X.* // Photonic spin Hall effect at metasurfaces // Science. 2013. V. 339. P. 1405–1407.
- 9. *Chen, X. Huang L., Mühlenbernd H., Li G., Bai B., Tan Q., Jin G., Qiu C.W., Zhang S., Zentgraf T.* Reversible three-dimensional focusing of visible light with ultrathin plasmonic flat lens // Adv. Optical Mater. 2013. V. 1. P. 517–521.
- 10. Pors A., Nielsen M.G., Eriksen, R.L., Bozhevolnyi, S.I. Broadband Focusing Flat Mirrors Based on Plasmonic Gradient Metasurfaces // Nano Lett. 2013. V. 13. P. 829–834.
- 11. *Ni X., Kildishev A.V., Shalaev, V.M.* Metasurface holograms for visible light // Nat. Commun. 2013. V. 4. № 2807. P. 1-6.
- 12. *Bao Q., Loh, K.P.* Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices // ACS Nano. 2012. V. 6. P. 3677–3694.

- 13. Yan H.G., Li X.S., Chandra B., Tulevski G., Wu Y.Q., Freitag M., Zhu W.J., Avouris P., Xia F.N. Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks // Nat. Nanotech. 2012. V. 7. P. 330–334.
- 14. *Gomez-Diaz J.S.*, *Tymchenko M.*, *Alù A*. Hyperbolic metasurfaces: surface plasmons, lightmatter interactions, and physical implementation using graphene strips // Opt. Mater. Express. 2015. V. 5. № 10. OME.5.002313.P. 2313–2329.
- 15. Давидович М.В. Фотонные кристаллы: функции Грина, интегро-дифференциальные уравнения, результаты моделирования // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 2. С. 150–163.
- 16. *Фальковский Л.А.* Динамические свойства графена// ЖЭТФ. 2012. Т. 142. № 3. С. 560–573.
- 17. Slepyan G.Ya., Maksimenko S.A., Lakhtakia L., Yevtushenko O., Gusakov A.V. Electrodynamics of Carbon Nanotubes: Dynamic Conductivity, Impedance Boundary Conditions, and Surface Wave Propagation // Phys. Rev. 1999. V. B 60. №24. P. 17136–17149.
- 18. *Hanson G.W.* Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene // J. Applied Physics. 2008. V. 103. P. 064302(1–8).
- 19. *Maksimenko S.A. Slepyan G.Ya.* Electrodynamic properties of carbon nanotubes / In Electromagnetic Fields in Unconventional Structures and Materials. Ed. by O. N. Singh and A. Lakhtakia, New York, John Wiley & Sons, Inc. 2000. P. 217–255.
- 20. *Maksimenko S., Slepyan G.* Electrodynamics of Carbon Nanotubes // J. Commun. Technol. Electron. 2002. V. 47. № 3. P.235–252.
- 21. Lovat G., Hanson G.W., Araneo R., Burghignoli P. Semiclassical spatially dispersive intraband conductivity tensor and quantum capacitance of graphene // Phys. Rev. 2013. V. B 87. № 11. P. 115429-11.
- 22. Economou E.N. Surface plasmons in thin films // Phys. Rev. 1969. V. 182. P. 539-554.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВОГО 2D-КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ/ГРАФЕН

В.В. Митрофанов, М.М. Слепченков, О.Е. Глухова Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: ip.boyar@gmail.com

В настоящее время в материаловедении интенсивно развивается направление, ориентированное на разработку 2D полупроводниковых материалов, перспективных в качестве элементной базы многофункциональных электронных устройств. Импульс к развитию исследований в этом направлении дало открытие графена и его уникальных физических свойств. Созданные на основе графена 2D материалы получили неоспоримые преимущества перед возможными аналогами благодаря особенностям своего строения, а именно атомарной толщине и гексагональной решетке. Присущие 2D материалам на графеновой основе квантовые ограничения позволяют использовать их при создании энергоэффективных, малогабаритных наноэлектронных устройств, предназначенных для сенсорики и преобразования энергии [1-2]. Не менее привлекательны-

ми 2D графеновые материалы выглядят и с оптической точки зрения. В частности, на графене уже предложен целый ряд устройств фотоники и оптоэлектроники, работающих в очень широком диапазоне длин волн - от УФ, видимой и ближней ИК областей спектра до средней и дальней ИК областей, а также терагерцового и СВЧ -диапазонов. Среди этих устройств можно назвать прозрачные электроды в дисплеях, солнечные батареи, оптические модуляторы и фотодетекторы [3-4]. Одной из последних разновидностей 2D графеновых материалов является гибридный нанокомпозит на основе двумерного графена (2D) и одномерных (1D) углеродных нанотрубок (УНТ). Наряду с уже хорошо известным «колонным графеном» [5], нашедшим свое применение в качестве перспективного материала для создания топливных элементов нового поколения и суперкондесаторов, в широкой печати все чаще стали появляться упоминания о другом типе композитов – углеродные нанотрубки (УНТ)/графен [6]. Отличительной чертой упомянутых структур является горизонтальная упаковка углеродных нанотрубок между графеновыми листами с образованием ковалентных связей трубки с графеном. Целью данной работы является исследование insilico закономерностей влияния топологии 2D-композитного материала УНТ-графен на их оптические свойства. Все исследования insilico проводятся в программном пакете MIZAR [7] с применением метода SCC DFTB2 [8].

В качестве 2D-композита нами рассматривается слой параллельных друг другу однослойных УНТ (ОУНТ), расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, заключенных межу двумя монослоями графена и соединенных с ними ковалентными связями. Исследования оптических свойств проводились для топологических моделей композитов с трубками вида (12,0), (14,0), (16,0) и (18,0), расстояние между которыми составляет 9-13 гексагонов. Ранее было показано [9], что термодинамически стабильными являются именно эти модели, поскольку процесс их формирования является экзотермичным. Предметом научного интереса в работе являлось изучение взаимодействия электромагнитного излучения с электронами в 2D-композите УНТ/графен посредством получения расчетных данных об основных оптических характеристиках композитного материала – коэффициентах отражения, поглощения и пропускания. Располагая информацией об оптическом отклике исследуемой системы на внешнее электромагнитное воздействие, можно будет определить сферу применения исследуемых композитов в оптоэлектронике. В результате серии численных экспериментов были установлены закономерности влияния топологии на оптические свойства гибридного 2D-композита УНТ/графен.

Работа выполнена при финансовой поддержке Стипендии Президента $P\Phi$ молодым ученым и аспирантам (проект №СП-3135.2016.1).

Библиографический список

1. *Kannan P.K.*, *Late D.J.*, *Morgan H.*, *Rout C.S.* Recent developments in 2D layered inorganic nanomaterials for sensing // Nanoscale. 2015. V. 7. P. 13293-13312.

- 2. *HuoN.,KangJ.,WeiZ., LiS.S., LiJ., Wei S.H.* Novel and Enhanced Optoelectronic Performances of Multilayer MoS₂–WS₂Heterostructure Transistors // Advanced Functional Materials. 2014. V. 24(44). P. 7025-7031.
- 3. *SunZ., MartinezA., WangF.* Optical modulators with 2D layered materials // Nature Photonics. 2016. V. 10. P. 227-238.
- 4. *Xia F., Wang H., Xiao D., Dubey M., Ramasubramaniam A.* Two-dimensional material nanophotonics // Nature Photonics. 2014. V. 8. P. 899-907.
- 5. *WangW.,OzkanM., Ozkan C.S.* Ultrafast high energy supercapacitors based on pillared graphene nanostructures // J. Mater. Chem. A. 2016. V. 4. P. 3356-3361.
- 6. *MaaroufA.A.*, *Kasry A.*, *Chandra B.*, *MartynG.J.* A graphene–carbon nanotube hybrid material for photovoltaic applications // Carbon. 2016. V. 102. P. 74-80.
- 7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612893. Многопроцессорный программно-информационный комплекс моделирования кристаллических структур для супер-ЭВМ «Міzar» / Глухова О.Е., Савостьянов Г.В. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.03.2016.
- 8. *ElstnerM.*, *Seifert G.* Density functional tight binding // Phil. Trans. R. Soc. A. 2014. V. 372.P. 20120483-1-20120483-12.
- 9. *MitrofanovV.V.*, *SlepchenkovM.M.*, *ZhangG.*, *GlukhovaO.E.*Hybrid carbon nanotube-graphene monolayer films: Regularities of structure, electronic and optical properties //Carbon. 2017. V. 115. P. 803-810.

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОМЕРНОГО СВЧ ВОЛНОВОДНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.А. Романов Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Описанные в работах [1–3] методы измерения параметров полупроводниковых структур с использованием СВЧ фотонных кристаллов предполагали, что измеряемая структура полностью заполняет поперечное сечение волновода.

В случае, когда вносимая в фотонный кристалл исследуемая структура лишь частично заполняет поперечное сечение волновода, для усиления отклика амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фотонного кристалла на её параметры представляет интерес изучение влияния её размеров и местоположения внутри предварительно созданной неоднородности, выполняющей роль микрорезонатора в фотонном кристалле [4]. Авторами [5] было показано, что создание большого числа малых воздушных включений внутри нарушенного слоя приводит к изменению АЧХ коэффициента пропускания фотонного кристалла, выражающееся, в частности, к сдвигу пика пропускания в запрещенной зоне в сторону высоких частот, то есть изменению частоты дефектной моды. В качестве альтернативы воздушным включениям для регулирования АЧХ фотонного кристалла можно рассматривать введение в нарушенный слой металлических включений.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния на АЧХ СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности введения внутрь нарушенного слоя проводящего включения малых размеров, частично заполняющего поперечное сечение волновода.

Исследовался волноводный фотонный кристалл, состоящий из одиннадцати слоев, в диапазоне частот 8-12 ГГц. Нечетные слои были выполнены из керамики (Al_2O_3 , $\varepsilon=9,6$), четные — из фторопласта ($\varepsilon=2,0$). Толщина нечетных слоев $d_{Al_2O_3}=1\,\mathrm{mm}$, четных $d_{\mathrm{tef}}=22\,\mathrm{mm}$. Слои полностью заполняли поперечное сечение волновода. Внутри нарушенного слоя в центре сечения волновода размещалось металлическое включение в виде алюминиевой пленки толщиной $100\,\mathrm{mkm}$, имеющей форму квадрата со стороной равной $3\,\mathrm{mm}$.

На основе численного моделирования с использованием программного обеспечения для трехмерного моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов ANSYS HFSS исследовались амплитудно-частотные характеристики коэффициента пропускания фотонного кристалла с нарушением периодичности при наличии металлического включения, внесенного внутрь нарушенного слоя.

Результаты расчета напряженности электрического поля электромагнитной волны показывают чередование узлов и пучностей внутри фотонного кристалла вдоль направления её распространения. При этом для выбранных параметров фотонного кристалла без металлического включения на частоте дефектной моды $f_{\rm res}$ в центре нарушенного слоя наблюдается узел поля.

Анализ АЧХ показывает, что наличие металлического включения в неоднородности приводит к сдвигу частоты дефектной моды $f_{\rm res}$ фотонного кристалла в область низких частот относительно частоты дефектной моды f_0 при отсутствии металлического включения в неоднородности. При этом величина сдвига $\Delta f = f_{\rm res} - f_0$ максимальна (Δf =63 MHz) при расположении включения на границе нарушенного слоя d=0 и уменьшается при смещении металлического включения к центру неоднородности (Δf =13 MHz при d=300 µm), Δf минимально при расположении металлического включения в центре неоднородности d=1.15 mm.

Расчеты показывают, что созданная дефектная мода при толщине d_{6tef} =2.3 mm (d_{6tef} </br/> \sim 2, где λ_{res} – длина волны на частоте дефектной моды) может быть реализована и при большей толщине d_{6tef} =14.5 mm (λ_{res} /2< d_{6tef} < λ_{res}), однако, в этом случае происходит существенное изменение распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вдоль направления её распространения на частоте дефектной моды, приводящее к возникновению пучности напряженности электрического поля в центре нарушенного слоя.

Анализ АЧХ фотонного кристалла с толщиной нарушенного слоя d_{6tef} =14.5 mm показывает, что наличие металлического включения в неоднородности и в этом случае приводит к сдвигу частоты дефектной моды фотонного кристалла в область низких частот. При этом величина сдвига максимальна при

расположении включения в центре нарушенного слоя и минимальна при расположении металлического включения на границе неоднородности.

Экспериментальные AЧX фотонного кристалла при различных положениях металлического включения с фиксированным размером $a_{\rm met}$ = 3 mm внутри нарушения размером 2.3 mm представлены на рис. 1. На вставке рис. 1 представлены AЧX фотонного кристалла вблизи частоты дефектной моды фотонного кристалла.

Сравнение расчетных и экспериментальных АЧХ фотонного кристалла при различных положениях металлического включения внутри нарушения при d_{6tef} =2.3 mm свидетельствует об их хорошем количественном совпадении и подтверждает, что величина сдвига максимальна при расположении включения в центре нарушенного слоя и минимальна при расположении металлического включения на границе неоднородности.

Были измерены АЧХ фотонного кристалла с увеличенной толщиной центрального нарушенного слоя равной 14.5 mm, анализ которых подтвердил результаты компьютерного моделирования, свидетельствующие, что величина сдвига дефектной моды в этом случае максимальна при расположении металлического включения на границе неоднородности и минимальна при расположении металлического включения в центре нарушенного слоя.

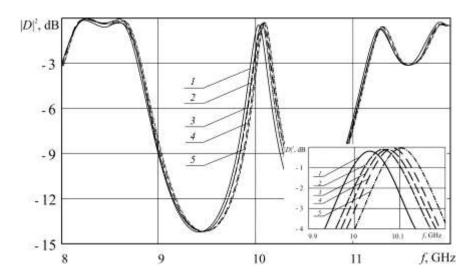


Рис.1 Экспериментальные АЧХ фотонного кристалла при различных положениях d внутри нарушения металлического включения с размером a_{met} =3 mm . d, μ m: l — 0, 2 —100, 3 — 200, 4 — 300, 5 — структура без металлического включения

Полученные результаты могут быть использованы, в частности, при конструировании СВЧ фотонных кристаллов с электрически управляемыми характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки $P\Phi$ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках// Известия вузов. Электроника. 2007. №6. С. 25–32.
- 2. *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. Т. 443, № 5, Апрель 2012. С. 564-566.
- 3. *Usanov D.A., Skripal A.V., Ponomarev D.V., Latysheva E.V., Nikitov S.A.* Microwave Photonic Structures and their Application for Measurements of Parameters of Thin Semiconductor Layers// Proceedings of the 44th European Microwave Conference. 6-9 Oct 2014, Rome, Italy. P. 984–987. 978
- 4. *Joannopoulos I.D.*, *Villenneuve Pierre R.*, *Fan Shanhui* Photonic crystals: putting a new twist on light // Nature. 1997. Vol.386. №13. P. 143–149.
- 5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Горлицкий В.О. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями// Журнал технической физики. 2016. Т. 86, вып. 2. С. 65–70.

3 МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

МАГНИТНАЯ ГИПЕРПОЛЯРИЗАЦИЯ И АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ПОДХОДЫ В МРТ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ

Ю.А.Пирогов Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова E-mail: yupi937@gmail.com

Магнитно-резонансная томография в современном виде была придумана всего 40 лет назад и отмечена в 2003 году Нобелевской премией по медицине, лауреатами ее были Пол Лотербур (университет Стоуни-Брук, Нью-Йорк, США) и Питер Мэнсфилд (Ноттингемский университет, Великобритания). На самом деле, первое предложение об использовании явления ЯМР для магнитнорезонансной визуализации было высказано на 13 лет раньше молодым офицером Советской армии В.А. Ивановым. К сожалению, патент Иванова сначала был отклонен нашим Патентным институтом и одобрен лишь в 1986 году, когдаМРТ сканеры появились уже в большинстве многопрофильных клиник во всем мире. Сейчас же никакой серьезный диагноз не ставится прохождения МРТ без диагностики. Метод информативен, особенно при диагностике мягких тканей живых организмов. Однако уровень ЯМР сигналов, формирующих МРТ изображение, как правило, невелик и для повышения отношения сигнала к шуму приходится применять специальные методы накопления ЯМР отклика и математической обработки изображений с существенными временными затратами. Величина сигнала определяется разницей населенности основного возбужденного резонансным воздействием уровней, радиочастотным которых располагаются выделенные заданным магнитным полем ядразамагниченного температуре ансамбля. При комнатной эта разница населенностей. определяющая поляризацию ансамбля, крайне невелика. Однако с помощью специальных гиперполяризационных приемов поляризация, а вместе с ней и ЯМР сигнал может быть увеличена на 5-6 порядков, что приведет к кардинальному улучшению сигнальных МРТ характеристик – уменьшению времени анализа, увеличению пространственного разрешения и контраста получаемых изображений. Впервые эта методика была разработана в Ноттингемском университете в МРТ Центре имени сэра Питера Мэнсфилда. Она позволила решить одну важнейшую, до этого нереализуемую задачу наблюдения тканей органов дыхания, внутренних очертаний

содержащих очень мало протонов, на ларморову частоту которых настроены регулярные медицинские томографы. Была разработана методика лазерной поляризации ядер благородных газов ксенона, гелия, криптона, вдыхание которых обеспечивает яркий отклик при настройке томографа на ларморову частоту гиперполяризованного газа [1,2]. В дальнейшем была поставлена задача обнаружения областей локализации введенных организм лекарственных препаратов, содержащих, например, атомы углерода С13 или кремния-29 [3,4]. Для этого была разработана методика динамической поляризации ядер (ДПЯ) при сверхнизких (субгелиевых) температурах и микроволновой накачке электронного ансамбля на частоте ЭПР с последующей передачей намагниченности электронов поляризуемым ядрам. Весьма затратная процедура, связанная с очень быстрой потерей гиперполяризованного состояния при размораживании препарата и инъекции его в организм. Однако сигнал от ядер, находящихся даже в несколько деполяризованном состоянии, оказывается настолько больше регулярных уровней, что яркие и отчетливые изображения тканей, содержащих гиперполяризованные вещества, удается получить за очень короткие времена, измеряемые десятками секунд. Поэтому трудности метода ДПЯ, формирующего гиперполяризованное состояние, могут считаться вполне оправданными, если находящиеся в этом состоянии вещества обеспечивают визуализацию, не реализуемую обычными способами. Эта года получила И в последние развивается два методика поистинепрорывного характера продолжение: микрочастицы кремния-29, покрытые полимерной оболочкой, будучи подвергнутыми воздействию ДПЯ процедур смогли удерживать гиперполяризованное состояние при комнатной температуре в течение десятков минут, до получаса. Теперь при использовании гиперполяризованных частиц кремния-29 в качестве либо самостоятельного лекарственного препарата либо в качестве биоконтейнера можно уверенно регистрировать место их нахождения в организме [4]. Физическая природа замедленной релаксации гиперполяризованного состояния частиц многоступенчатых действии процессов диффузии заключается намагниченного состояния от поверхностных слоев во внутренние отделы микрочастиц при намагничивании и обратной такого же рода ступенчатой деполяризационной диффузии после их размораживания. В этом процессе присутствуют 3 основных этапа. При помещении микрочастиц в магнитное поле интенсивностью 1-2 Тл и облучении микроволнами на частоте 80-90 ГГц квазисвободные электроны на дефектах поврхности кремния под полимерной оболочкой поляризуются за счет эффекта ЭПР и передают затем свою намагниченность верхним слоям ядер Si-29 посредством электрон-ядерного эффекта Оверхаузера. В свою очередь от гиперполяризованных поверхностных слоев ядер кремния намагниченность переносится на более глубокие слои под действием ядер-ядерного эффекта Оверхаузера И Т.Д. гиперполяризованного состояния. Такой процесс диффузии намагниченности от наружных слоев кремниевых частиц до глубинных занимает 10-20 часов, тогда как обратная диффузия размагничивания от наружных слоев к глубинным протекает намного быстрее - около получаса, которого, однако, вполне достаточно для медицинских процедур.

Однако гиперполяризационные технологии являются весьма затратными криогенной требуя для своей реализации трудоемкими, наличие инфраструктуры в комбинации со специальными микроволновыми или лазерными установками. В этой связи актуальными являются поиски других, альтернативных способов улучшения МРТ визуализации, не связанных с гиперполяризационными процедурами. Одним из таких методов является использование фторсодержащих препаратов, дающих на ларморовой частоте фтора-19 достаточно интенсивный сигнал. Работа томографа на частоте фтора является функционально близкой к протонной ЯМР томографии – ларморова частота ядер фтора всего на 5% отличается от протонной и допускает перестройку стандартных приемо-передающих катушек медицинских томографов на частоту фтора-19, природное содержание которого является 100%-ным, т.е. даже лучшим, чем у водорода. Особым достоинством медицинской диагностики на ядрах фтора является почти полное отсутствие этих ядер в тканях человека и животных – ЯМР сигнал от введенных ядер фтора-19 будет наблюдаться, таким образом, на нулевом сигнальном фоне тканей, свободных от введенного в организм фторсодержащего препарата. Наиболее ярко достоинство фторных методик МРТ по сравнению с гиперполяризацией проявляется при диагностике полых областей, например, легких или желудочно-кишечного тракта. Так, наполнение легких фторными газами дает четкое изображение внутренней структуры органов дыхания и позволяет выявить патологические морфологии на стенках легочной ткани [5]. Инъекция специально синтезированных фторсодержащих жидкостей может также существенно улучшать контрастирование МРТ изображений.

Исследования на ядрах фтора-19 были выполнены на оборудовании ЦКП и УНУ «Биоспектротомография» и поддержаны грантом РФФИ№17-02-00465 А.

Библиографический список

- 1. Fain S. et al. Functional lung imaging using hyperpolarized gas MRI //Journal of Magnetic Resonance.2007. V. 25. P.910-923.
- 2. *Tsai L.L. et al.* Human lung imaging in supine versus upright positions with a 6.5 mT openaccess He-3 MRI system: Initial results // ISMRM. 2007.
- 3. *Golman K. et al.* Molecular imaging using hyperpolarized C-13 // British Journal of Radiology. 2003. V. 76. P. S118-S127.
- 4. *Cassidy M.C. et al.* In vivo magnetic resonance imaging of hyperpolarized silicon particles // Nature Nanotechnology. 2013. V. 8. May. P. 363-368.
- 5. *Jose' M. Pe'rez et al.* In vivo diffusion weighted FMRI using SF // Magnetic Resonance in Medicine. 2005. V. 54. P. 460–463.

ЗАЩИТА ОПЕРАТОРОВ СЛОЖНЫХ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ ВРЕДОНОСНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.Б. Титов, И.С. Дробот, Е.П. Полякова Военная академия РВСН им. Петра Великого, г. Москва E-mail: isdrobot@list.ru

Вредоносное влияние на операторов (дежурные смены, личный состав пунктов управления) может привести к ошибочным действиям персонала, которые повлекут тяжелые последствия, вплоть до срыва выполнения профессиональных (боевых) задач [1].

При этом отмечается, что нарушения функционирования АСУ более чем в 50 % случаев являются следствием ошибок персонала, которые связаны с неправильным выполнением или невыполнением операторами действий, в том числе из-за неверной оценки обстановки. При этом ошибки, связанные с неудовлетворительным психофизиологическим состоянием оператора (около 25%), могут возникать независимо от его квалификации и опыта [1].

Современные средства диагностики состояния человека [1,2] позволяют определить изменения психофизиологических показателей организма в процессе деятельности, оценить их характер, а также последствия индивидуально для каждого специалиста.

С целью повышения защищенности операторов сложных военнотехнических систем от внешних деструктивных воздействий разработана модель системы защиты.

Элементами данной модели являются:

деструктивные факторы среды, генераторы излечений, информационная инфраструктура, а также возможные каналы доставки вредоносных воздействий, влияющих на состояние операторов;

субъекты деятельности – операторы дежурных смен пунктов управления, а также элементы АСУ, средства автоматизации технологических процессов, с помощью которых осуществляется управление;

подсистема мониторинга состояния операторов, скоррелированная с системой мониторинга деятельности самой АСУ и включающая методы и средства диагностики состояния операторов;

подсистема сопровождения деятельности операторов, включающая современные способы и средства обеспечения и поддержания надежности специалистов дежурных смен пунктов управления, как в стандартных условиях деятельности, так и в условиях деструктивного воздействия на них.

Выполнение основных функций указанной системы осуществляется в ходе реализации технологии защиты операторов сложных военно-технических систем от внешних деструктивных воздействий. Основной целью предлагаемой

технологии является достижение и поддержание профессиональной надежности специалистов.

В настоящее время для диагностики состояния человека широко используются современные компьютерные технологии сбора, обработки, накопления и анализа информации, которые включают, имитационные модели и подсистемы отображения информации методами обратной связи по различным биомеханическим параметрам. В качестве основных выделяют: электрокардиография, определение соотношения ритмов сердечной и дыхательной деятельности; технологии газоразрядной визуализации, регистрация пульсового сигнала, а также ряд других методов:, электромиография, спирометрия, электросоматография, кожно-гальваническая реакция, стабилометрия, нелинейные методы диагностики и др.

Несмотря на разнообразие методов и средств диагностики состояния человека, принятие решения о состоянии оператора на основе тех или иных выявляемых информативных признаков остается весьма сложной задачей. Малые отклонения информативных параметров от усредненных значений могут нести существенные сведения о состоянии контролируемого объекта (человека) в целом.

С целью адекватного формирования и оценки состояния операторов нами используется одновременно несколько аппаратно-программных комплексов (АПК):

АПК мониторинга адаптационных возможностей организма («ВИКАБОС», авторы Коломийцев А.И., Кривоконь В.И., Титов В.Б.), позволяющий по результатам диагностики функционального и психофизиологического состояния на основе динамической регистрации вызванной электропроводности в аномальных точках кожи создать полипараметрический образ оператора;

АПК экспресс-оценки состояния организма по регистрации изменений в органах и гистологических структурах («Метатрон», разработчик ООО «Институт прикладной психофизики», Омск), с помощью которого определялась степень влияния возможного (выявленного) воздействия на непосредственно состояние оператора.

По результатам сравнительного анализа временных характеристик существующих подходов к обнаружению и идентификации негативного влияния на психофизиологическое состояние человека-оператора спрогнозировано сокращение затрачиваемого на это времени при совместном использовании АПК.

Это позволяет использовать адекватные модели обнаружения изменения состояния оператора с целью минимизации времени на обработку результатов мониторинга. Такая модель разработана на основе фиксации изменения распределения результатов анализа состояния субъектов деятельности с использованием современного метода принятия решений в режиме реального времени при динамическом анализе статистических данных, получаемых в теории обнаружения сигналов на фоне помех [5].

Использование в подсистеме сопровождения деятельности операторов современных способов и средств обеспечения и поддержания надежности специалистов дежурных смен пунктов управления, потребовало уточнить основные функции всестороннего (акмеологического) сопровождения деятельности и профессионализации специалистов, а также определить действия медицинского, психологического, организационно-технического и организационного характера. В результате осуществляется прогноз изменения состояния субъекта деятельности в ходе воздействия и «подбираются» способы и приемы защиты от этих воздействий. При этом подбор осуществляется индивидуально для каждого оператора и, в ходе последующей работы, результаты накапливаются и обобщаются [6].

Библиографический список

- 1. Смолян Γ .Л. Человеческий фактор в обеспечении безопасности информационной инфраструктуры [Текст] // Γ .Л. Смолян, Γ .Н. Солнцева (Электронный ресурс) URL: http://elibrary.ru/download/ elibrary_9118229_94656197.pdf (дата обращения 25.02.2017).
- 2. Емельянова В.О., Кривоконь В.И., Титов В.Б. Биокоррекция. Модели, приборы, системы. // Ставрополь, 1997. 192 с.
- 3. Горнов С.В., Щегольков А.М., Титов В.Б., Горнов В.В., Овинников А.А. Изучение влияния стрессовых воздействий на готовность авиационных специалистов к выполнению профессиональных действий// РМЖ (Русский медицинский журнал). 2016. Т. 24. № 13. С. 880-883.
- 4. Дробот И.С., Тимченко, В.В. Комплексный подход к выявлению техногенного воздействия на состояние субъектов деятельности. // Мир образования образование в мире. №2. 2016 г. С. 204-207.
- 5. *Мартьянов, А.Н., Дробот, И.С.* Метод мониторинга состояния операторов сложных военно-технических систем // Электронный журнал «Вооружение и экономика», 2016, N 4 (37), C. 12-18.
- 6. Дробот, И.С. Акмеологическое сопровождение формирования готовности обучающихся к профессиональной деятельности// Alma mater (Вестник высшей школы). М.: Издво РУДН, 2016, №11. С. 43-48.

ВЛИЯНИЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗМЕР И МОРФОЛОГИЮ БИОСОВМЕСТИМОГО ГИДРОКСИАПАТИТА КАЛЬЦИЯ

 $H.A.\ 3axapos^1,\ M.A.\ Opлos^1,\ E.B.\ Шелехов^2,\ Л.И.\ Демина^3,\ A.Д.\ Aлиев^3,\ M.P.\ Киселёв^3,\ B.B.\ Матвеев^3,\ T.B.\ 3axaposa^1,\ H.T.\ Кузнецов^1$ 1 Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова, г. Москва 2 НИТУ «МИСиС», г. Москва

³Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, г. Москва E-mail: zakharov@igic.ras.ru

Определено влияние воздействия СВЧ излучения на размеры и морфологию нанокристаллов биосовместимого гидроксиапатита кальция $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (ГА) (НКГА) при синтезе из водных растворов в системе $Ca(OH)_2$ – H_3PO_4 – H_2O . На основе результатов физико-химического анализа (хи-

мического, РФА, ИКС, ТГА) продуктов синтеза проанализированы фундаментальные взаимосвязи системы: «состав — условия синтеза — структура — дисперсность — свойства» при воздействии СВЧ в условиях синтеза, моделирующих процесс биоминерализации неорганической компоненты костной ткани.

Важнейшей задачей современной химии является разработка эффективных методов направленного синтеза материалов, позволяющих снизить энергозатраты и увеличить скорость образования конечных продуктов синтеза [1]. К числу эффективных подходов решения этой задачи относится использование внешних воздействий, связанных с использованием механохимической, ультразвуковой и сверхвысокочастотной (СВЧ) обработки продуктов синтеза. Микроволновое (СВЧ) воздействие в ходе синтеза относится к одному из наиболее перспективных подходов оптимизации химических процессов, часто позволяющих добиться результатов, которые невозможно реализовать при помощи других методов. СВЧ излучение, располагающееся, как принято считать, в диапазоне частот 300 ГГц-300 МГц способно в десятки и сотни раз ускорять многие химические процессы, вызывая при этом быстрый объемный нагрев жидких и твердых образцов [2]. Особенностью воздействия СВЧ излучения, обладающего высокой проникающей способностью, является взаимодействие микроволнового излучения с молекулами и ионами облучаемого материала по всему объему облучаемого образца, вызывая эффективную генерацию тепла «внутри» самого материала (в отличие от случая подведения его от внешнего источника нагревания).

Стехиометрический гидроксиапатит кальция ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, ΓA) представляет собой кристаллохимический аналог неорганической компонентой костной ткани. Благодаря высокой биосовместимости и биоактивности ΓA широко используется в медицине в качестве материала имплантатов и в костном инжиниринге. Биологические апатиты нативных тканей млекопитающих являются основными составляющими ($\sim 60\%$) костной и зубной тканей и представляют собой наноразмерные ($\sim 5-50$ нм) кристаллы с катионными и анионными замещениями в кристаллической структуре ΓA [3,4]. Стехиометрический нанокристаллический ΓA (НК ΓA) является основой для получения керамики и композиционных метериалов на основе фосфатов кальция и модельным объектом для изучения влияния различных факторов на физико-химические и медикобиологические характеристики неорганической компоненты костной и зубной тканей.

Ниже сообщается о характере и степени влияния длительности воздействия СВЧ излучения на НКГА в ходе его осаждения из водных растворов в системе $Ca(OH)_2$ – H_3PO_4 – H_2O .

Синтез ГА из водного раствора в системе $Ca(OH)_2$ – H_3PO_4 – H_2O проводили на воздухе в течение 2, 5 и 10 мин. с использованием СВЧ-нагрева (F=2450 МГц; W=700 Вт). По окончании синтеза раствор отстаивали, декантировали и сушили на воздухе при 100^{0} С.

Продуктом синтеза являлся гексагональный (пр. гр. $P6_3/m$) НКГА стехиометрического (Ca/P=1.67) состава, параметры элементарной ячейки которого находятся в удовлетворительном соответствии с табличными данными (JCPDS N_2 9-432: a=9.418 Å; c=6.884 Å) (табл. 1).

Таблица 1. Кристаллографические и морфологические характеристики НКГА, образующегося в системе $Ca(OH)_2$ – H_3PO_4 - H_2O в ходе синтеза под воздействием СВЧ в продолжение 0, 2, 5 и 10 мин.

 $(\parallel C, \perp C$ – размеры НКГА вдоль и перпендикулярно гексагональной оси "c", соответственно)

Время воздей-	Состав	Параметры э.я., Å		Размеры кри- сталлов, нм	
ствия СВЧ, мин.	(брутто, с учетом адсорбированной воды)	а	c	C C	
0	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂ ·5.0H ₂ O	9,421	6,889	38	21
2	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂ ·3.9H ₂ O	9.415	6.879	33	24
5	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂ ·4.3 H ₂ O	9.415	6.881	34	26
10	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂ ·4.2 H ₂ O	9.413	6.880	39	21

Результатом воздействия СВЧ в ходе синтеза ГА является интенсификация химических процессов, приводящая к уменьшению времени синтеза. Этот эффект сочетается с уменьшением размеров НКГА вдоль осей "c" и "a" при кратковременном (2 мин.) воздействии СВЧ и последующим уменьшением НКГА при увеличении длительности (5, 10 мин.) воздействия СВЧ излучения (рис. 1).

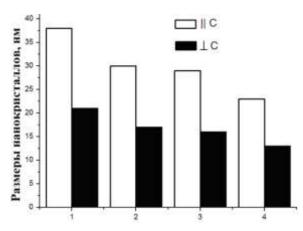


Рис. 1. Геометрические характеристики НКГА, синтезированных, синтезированный в биомиметических условиях (37°C, 3 ч) (*I*) и под воздействием СВЧ в продолжение 2 (*2*), 5 (3) и 10 (4) мин.

Информация о влиянии СВЧ-излучения на процесс синтеза НКГА в системе $Ca(OH)_2$ – H_3PO_4 – H_2O может представлять интерес для создания методов направленного синтеза биосовместимых материалов на основе фосфатов кальция для имплантатов и оценки возможного воздействия СВЧ на процессы биоминерализации в ходе образования костной ткани.

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

Библиографический список

- 1. *Петров Ю.Б.* Индукционная плавка оксидов // Л.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1983. 104 с.
- 2. *Бердоносов С.С.* Микроволновая химия // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т.7. № 1. С. 32–38.
- 3. Захаров Н.А., Калинников В.Т. Фундаментальные науки медицине. Биофизические медицинские технологии. Т. 2 / Под ред. А.И. Григорьева, Ю.А. Владимирова. М.: МАКС Пресс, 2015. С. 145-169.
- 4. *Dorozhkin, S.V.* Calciumorthophosphates // Biomatter. 2011.V. 1. № 2.P. 121-164.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КРОВИ КРЫСЫ ПРИ ПЕРИТОНИТЕ

Е.А. Козлова¹, В.И. Кочубей¹, А.К. Мырзагалиев², С.Ю. Городков²

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

²Саратовский медицинский государственный университет им. В.И. Разумовского E-mail:kate.kozlova64@yandex.ru

<u>Перитонит</u>— это бактериальный или асептический воспалительный процесс, который развивается в брюшной полости. На начальных стадиях, перитонит можно легко принять за одно из ряда других заболеваний. Единственно правильный метод лечения острого перитонита — раннее оперативное вмешательство.

Отсутствие надежного метода, позволяющего быстро определить наличие перитонита, в значительной степени снижает эффективность лечения. Правильный диагноз на ранних этапах патологического процесса в сочетании с эффективными методами лечения позволяет достоверно повысить вероятность благоприятного исхода, увеличить выживаемость. Поэтому создание малоинвазивного, точного метода ранней диагностики, не требующего сложной технической базы, является весьма актуальной задачей.

Следует отметить, что, несмотря на значительное количество клинических и экспериментальных исследований, методы ранней диагностики перитонита практически не разработаны. Поэтому целью исследований является изучение поведения спектров люминесценции мазка и плазмы крови в норме и патологии. Это должно создать основу для диагностики воспалительного процес-

са органов брюшной полости путем проведения люминесцентного спектрального анализа крови.

Флуоресцентная спектроскопия является одним из самых высокочувствительных методов, позволяющих детектировать очень низкие концентрации веществ (мкМ, нМ и даже пМ) и отличать одно вещество от другого. Она является чрезвычайно информативным методом, поскольку позволяет получать данные о структурных свойствах и ориентации, конформационной подвижности, комплексообразовании и о межмолекулярных взаимодействиях. Достоинством флуоресцентной спектроскопии является также отсутствие повреждения образца в ходе исследования. Использование собственной флуоресценции (аутофлуоресценции) для прижизненной диагностики тканей является привлекательным, вследствие высокой чувствительности и избирательности. При этом практически не изменяются условия протекания основных биохимических процессов в биотканях. Собственными флуорофорами крови являются: порфирины, гемоглобин, билирубин, NADH, флавины, липопигменты.

На рис.1 представлены экспериментально полученные спектры люминесценции мазка и плазмы крови. Люминесценция возбуждалась на длине волны 330 нм.

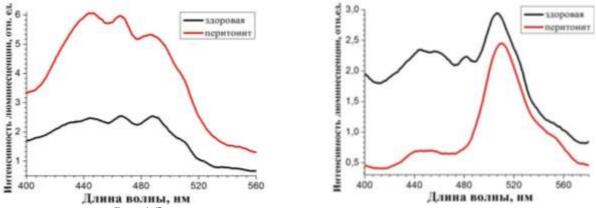


Рис. 1 Экспериментально полученные спектры люминесценции мазка и плазмы крови.

На спектрах виден общий контур люминесценции, характерный для белков. На этом фоне видны спектры поглощения флуорофоров, а именно: поглощение на 460нм характерно для билирубина, 530-560нм для гемоглобина. При наличии патологического процесса в брюшной полости наблюдается изменение формы спектра плазмы крови, что говорит об изменении состава крови. Также при патологии наблюдается увеличение общей интенсивности флуоресценции мазка крови. Можно предположить, что отношение интенсивностей флуоресценции после дополнительных исследований, может быть использовано в качестве критерия наличия патологии. Эти различия можно использовать для диагностики патологического процесса.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации HIII-7898.2016.

Библиографический список

- 1. *Комов В.П., Шведова В.Н.* Биохимия // ГОРОД: Дрофа. 2004. 638 с.
- 2. *Кочубей В.И., Конюхова Ю.Г.* Методы спектральных исследований крови и костного мозга // Саратов: Изд. СГУ. 2000. 72 с.
- 3. Новиков И.А., Осипова Е.А., Медико-биологические аспекты флуоресцентной диагностики [Электронный ресурс]. URL:http://www.cancerplot.ru/mediko-biologicheskie aspekty fluorescentnoj diagnostiki (дата обращения: 20.05.16.) Яз.рус.
- 4. *Косинец В.А.* Нутритивная поддержка организма в условиях критических состояний // Новости хирургии. Т. 21, № 2. 2013. С. 5
- 5. *Шапошников В.И.* Биохимические механизмы гомеостаза при перитоните // Современные проблемы науки и образования. 2004. № 1. с. 91-92

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОАЛМАЗОВ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ВЫСОКОТОКСИЧНЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ СРЕДСТВ: МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

И.Л. Пластун, А.Н. Бокарев, К.Е. Агандеева, М.С. Сивожелезов Саратовский государственный технический университет им.Ю.А.Гагарина E-mail: inna pls@mail.ru, andreybokarev@mail.ru

Интерес к использованию алмазоподобных соединений, называемых диамондоидами или наноалмазами, в различных прикладных областях биохимии и медицины в настоящее время постоянно растёт. Одной из перспективных задач, связанных с наноалмазами, является использование их в качестве средства направленной доставки высокотоксичных лекарственных препаратов [1]. Подобные возможности достигаются за счёт образования комплексных соединений диамондоидов с лекарственными веществами и биомолекулами.

Целью представленной работы является исследование методами молекулярного моделирования возможности образования устойчивых соединений, включающих биомолекулы, наноалмазы и лекарственные препараты, а также исследование их структуры и спектров. Моделирование структуры и расчёт ИК-спектров получаемых молекулярных комплексов осуществлялось на основе теории функционала плотности [2] с использованием функционала ВЗLYР и базисного набора 6-31G. Для расчётов был использован программный комплекс Gaussian 09. Была исследована возможность образования молекулярного комплекса, включающего лекарственный препарат, наночастицу, используемую как якорь для направленной доставки и удержания лекарства в клетке, и биомолекулу, с которой взаимодействует лекарственный препарат. Поскольку основным объектом лекарственного воздействия на клеточном уровне как правило является ДНК, то были рассмотрены основные структурные составляющие ДНК и РНК, а именно два азотистых основания – аденин (C₅H₅N₅) и тимин $(C_5H_6N_2O_2)$, образующие комплементарную пару, структура и рассчитанный ИК-спектр которой показаны на рис.1. Цифрами показаны водородные связи, образующиеся в комплементарной паре. Диамондоиды [3] представляют собой наименьшие алмазоподобные углеводородные кластеры размером порядка нескольких нанометров. Как пример диамондоида была рассмотрена 1,3,5,7- адамантантетракарбоновая кислота ($C_{14}H_{16}O_8$), или адамантан, обогащённый четырьмя СООН-группами (её структура показана на рис.2а).

Ранее нами было показано, что данное вещество по своим свойствам и возможностям взаимодействия практически идентично карбоксилированным детонационным наноалмазам [4], что видно из сравнения рассчитанных нами ИК-спектров 1,3,5,7- адамантантетракарбоновой кислоты и экспериментальных ИК-спектров карбоксилированных наноалмазов, измереных в лаборатории лазерной спектроскопии физического факультета МГУ (рис.2б). Данные наноалмазы в силу их размера — от 5 до 50нм — являются весьма удобными «якорями» для удержания лекарственного препарата в клетке.

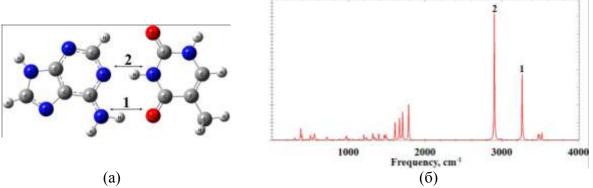


Рис. 1. Структура (a) и рассчитанный ИК-спектр (б) комплементарной пары аденин-тимин

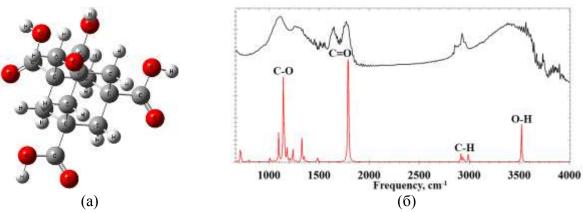


Рис. 2. Структура (а) и рассчитанный ИК-спектр (б) 1,3,5,7-адамантантетракар-боновой кислоты (б, внизу) и экспериментьлальный ИК-спектр наноалмаза, обогащённого карбоксильными группами (б, вверху)

В качестве доставляемого лекарственного средства был рассмотрен препарат доксорубицин ($C_{27}H_{29}NO_{11}$) представляющий собой известный высокотоксичный антибиотик, применяющийся в химиотерапии злокачественных опухолей. Его структура и рассчитанный ИК-спектр показаны на рис.3.

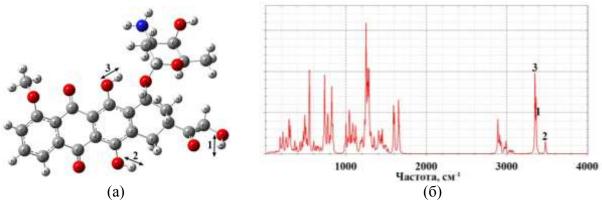


Рис. 3. Структура (а) и рассчитанный ИК-спектр (б) доксорубицина

В результате молекулярного моделирования нами была рассчитана структура и ИК-спектр комплексного соединения, включающего доксорубицин, 1,3,5,7- адамантантетракарбоновую кислоту и комплементарную пару аденинтимин, а также водный раствор полученного комплекса. Структура и ИК-спектр рассчитанного молекулярного комплекса показаны на рис.4.

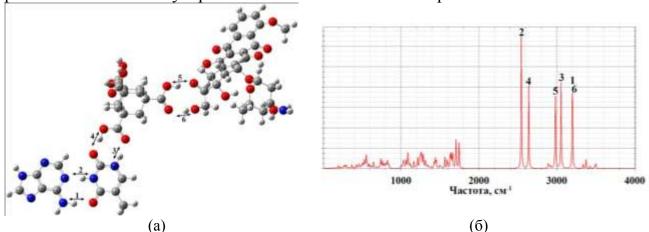


Рис. 4. Структура (а) и рассчитанный ИК-спектр (б) молекулярного комплекса, включающего доксорубицин, 1,3,5,7-адамантантетракарбоновую кислоту и комплементарную пару аденинтимин

Было обнаружено, что между молекулами в рассматриваемом комплексе образуются водородные связи (показаны цифрами на рис. 4), что позволяет сделать вывод о возможности использования диамондоидов в качестве «якорей» для направленной доставки и удержания высокотоксичных лекарственных средств в клетках живых организмов.

Библиографический список

- 1. Гонсалвес К., Хальберштадт К., Лоренсин К., Наир Л. Наноструктуры в биомедицине// М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.519 с.
- 2. Кон В. Электронная структура вещества волновые функции и функционалы плотности // Успехи физических наук. 2002. Т.172, №3. С.336-348.
- 3. Беленков Е.А., Ивановская В.В., Ивановский А.Л. Наноалмазы и родственные углеродные наноматериалы. Компьютерное материаловедение// Екатеринбург :УрО РАН, 2008. 169 с.

4. *Бокарев А.Н., Пластун И.Л., Агандеева К.Е.* Влияние водородной связи на ИК-спектры и структуру молекулярного комплекса алмазоподобных наночастиц и азотистых оснований ДНК // Известия СГУ. Новая серия. Серия физика. 2016. Т.16. №4. С.218-227.

МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МИЦЕЛЛ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ФЛАВОНОИДОВ

М.С. Сивожелезов, И.Л. Пластун, К.Е. Агандеева, А.Н. Бокарев Саратовский государственный технический университет им. Ю.А.Гагарина E-mail: msivozelezov@mail.ru, inna pls@mail.ru

Одной из наиболее актуальных задач биомедицины является исследование новых возможностей использования лекарственных препаратов на основе растительного сырья, причём наиболее высокий интерес наблюдается к флавоносодержащим соединениям [1] в силу их распространенности и высокой биологической активности. Одним из таких соединений является кверцетин ($C_{15}H_{10}O_7$), содержащийся во многих растительных культурах, и являющийся одним из самых сильных антиоксидантов. В настоящее время проводятся разнообразные клинические исследования по определению его положительного воздействия на ранних стадиях различных заболеваний [2]. Химическая активность кверцетина объясняется тем, что он содержит полифенольную химическую подструктуру, выступающую в качестве акцептора свободных радикалов. Именно эта особенность привлекает внимание к кверцетину как к веществу для направленной доставки при помощи некоторого контейнера.

В представленном исследовании в качестве контейнера для транспорта кверцетина рассматривается нетоксичный полимер (поверхностно-активное вещество (ПАВ)) Тритон X-100 ($C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n(_{n=9-10})$), являющийся основой для так называемых детергентов, которые широко используются в биохимических опытах и представляют собой мягкие поверхностно-активные реагенты, применяемые для расщепления мембраны клеток, а также трансформации внутриклеточного материала в растворимую форму. Выбор данного вещества обуславливается тем, что детергенты способны разрушать межбелковые, белково-липидные и межлипидные связи и ускорять процессы денатурации белковых структур. Кроме того, ПАВ Тритон X-100 достаточно легко может образовывать так называемые мицеллы – капсулы, в которые можно помещать доставляемое лекарственное вещество.

В представленной работе методом теории функционала плотности с использованием функционала ВЗLYР и базисного набора 6-31G(d) [3] было исследовано межмолекулярное взаимодействие кверцетина и ПАВ Тритон X-100, а также их водных растворов на предмет образования прочных водородных связей, способствующих удержанию кверцетина внутри мицеллы в течение всего времени доставки. Для расчётов использовался программный комплекс

Gaussian 09. Были проанализированы ИК-спектры и структура образующихся молекулярных комплексов, а также параметры водородных связей, образующихся в мицелле при взаимодействии доставляемого кверцетина с оболочкой ПАВ Тритон X-100.

Структура и рассчитанные ИК-спектры составляющих транспортируемой мицеллы показаны на рис.1 (содержимое мицеллы – кверцетин) и рис.2 (оболочка мицеллы - ПАВ Тритон X-100).

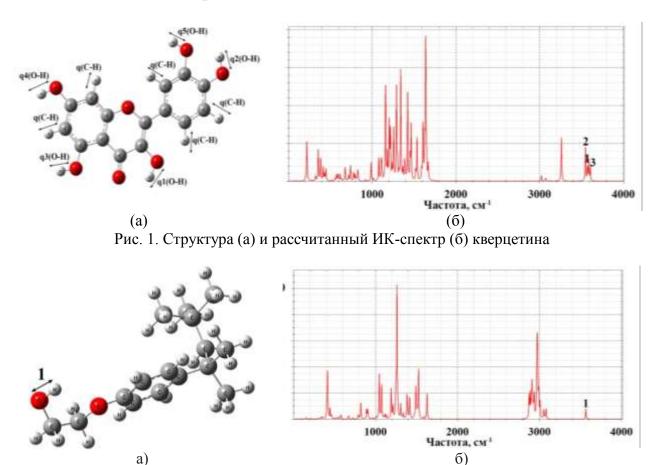


Рис. 2. Структура (а) и рассчитанный ИК-спектр (б) ПАВ Тритон Х-100

На рис. 1 и рис.2 цифрами показаны образующиеся водородные связи в кверцетине и в ПАВ Тритон X-100.

Рассмотрим более подробно параметры образующихся водородных связей в молекулярном комплексе кверцетин - Тритон X-100 и в водном растворе, окружающем мицеллу. Рассчитанная структура и ИК-спектры полученного комплекса, а также его водного раствора демонстрируются на рис.3 и рис.4, соответственно.

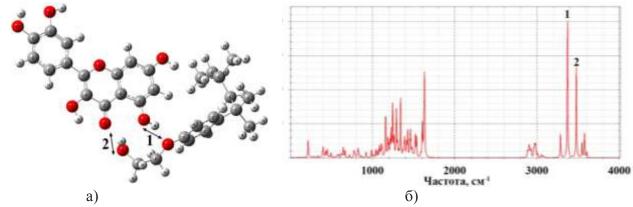


Рис. 3. Структура (a) и рассчитанный ИК-спектр (б) молекулярного комплекса мицеллы: кверцетин (содержимое) и ПАВ Тритон X-100 (оболочка).

Цифрами обозначены обнаруженные в результате расчётов водородные связи между атомами в образовавшемся молекулярном комплексе.

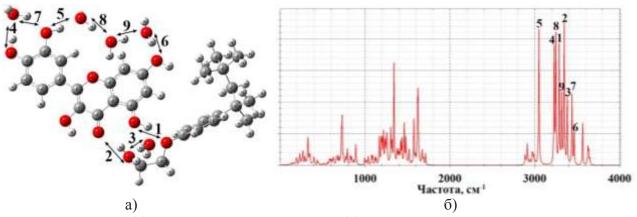


Рис. 4. Структура (а) и рассчитанный ИК-спектр (б) водного раствора молекулярного комплекса мицеллы: кверцетин (содержимое) и ПАВ Тритон X-100 (оболочка), объединённые с пятью молекулами воды

Таблица 1. Рассчитанные параметры водородных связей, образующихся в молекулярном комплексе мицеллы (ПАВ Тритон X-100 и кверцетин)

		Ковалентная связь с доно-		Водородная связь с акцеп-			Δν, cm ⁻¹
	№ ром		тором		ν, cm ⁻¹		
		Обозначение	Длина, Å	Обозначение	Длина, Å		
ĺ	1	О-Н	0,98	НО	1,8	3371	201
Ī	2	О-Н	0,98	НО	2,07	3479	87

Из приведённых таблиц 1 и 2 можно заметить, что по сравнению с безводным комплексом, в водном растворе происходят увеличение частотных сдвигов, характеризующих водородные связи 1 и 2 (табл. 2) на 81см⁻¹ и 131см⁻¹, соответственно. Это говорит об усилении данных связей в водном растворе. Также длины мостиков водородных связей 1 и 2, образующихся в водном растворе, уменьшаются и составляют 1,74 Å и 1,9 Å, соответственно, что также свидетельствует об усилении водородной связи.

Таблица 2. Рассчитанные параметры водородных связей, образующихся в комплексе тритонкверцетин с 5 молекулами воды

	Городонация	ODGOL O HOUO	Родородиод	DEST OFFICE		
	Ковалентная связь с доно-		Водородная связь с акцеп-		,	1
$N_{\underline{0}}$	ром		тором		ν, cm ⁻¹	Δv , cm ⁻¹
	Обозначение	Длина, Å	Обозначение	Длина, Å		
1	О-Н	0,99	НО	1,74	3290	282
2	О-Н	0,98	НО	1,9	3348	218
3	О-Н	0,98	НО	1,83	3385	180
4	О-Н	0,99	НО	1,77	3230	319
5	О-Н	1	НО	1,68	3050	557
6	О-Н	0,98	НО	1,91	3466	99
7	О-Н	0,98	НО	1,83	3440	125
8	О-Н	0,99	НО	1,73	3250	315
9	О-Н	0,99	НО	1,79	3320	245

Таким образом, можно сделать вывод, что за счёт образования достаточно сильных водородных связей устанавливается прочное межмолекулярное взаимодействие кверцетина и ПАВ Тритон X-100. При этом необходимо отметить, что в водных растворах, соответствующих реальным биологическим системам, прочность устанавливаемых водородных связей усиливается, что даёт возможность говорить об образовании устойчивых долгоживущих мицелл на основе ПАВ Тритон X-100 для транспортировки флавоносодержащих соединений на примере кверцетина.

Библиографический список

- 1. *Тараховский Ю.С., Ким Ю.А., Абдрасилов Б.С., Музафаров Е.Н.* Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина // Пущино, Synchrobook, 2013, 309 с.
- 2. Sathyadevi M., Subramanian S. Extraction, Isolation and characterization of bioactive flavonoids from the fruits of physalisperuvianalinn extract// Asian journal of pharmaceutical and clinical research, vol. 8, iss. 1, 2015, p. 152-157.
- 3. *Кон В.* Электронная структура вещества волновые функции и функционалы плотности *Попл Дж. А.* Квантово-химические модели // Успехи физических наук. 2002. Т.172, №3. С.336-356.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ, КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ САХАРОВ

К.И. Придачина, Э.А. Генина, А.Н. Башкатов Саратовский национальный исследовательский государственный университетим. Н.Г. Чернышевского E-mail:krendelks2275@gmail.com

В основе метода оптического просветления биотканей лежит согласование показателей преломления рассеивающих центров и внутритканевой жидкости за счёт введения в ткань соответствующих агентов, обладающих достаточно высоким показателем преломления. Растворы сахаров являются биосовме-

стимыми жидкостями, которые часто используются в качестве оптических просветляющих агентов[1-3].

Для решения задач, связанных с оценкой коэффициента диффузии глюкозы, фруктозы и других сахаров в биологических тканях, необходимо знание спектральной, концентрационной и температурной зависимостей их показателя преломления.

В работе исследовались водные растворы глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы с весообъёмными концентрациями 10, 20, 30, 40 и 50%. Для измерения показателей преломления растворов на длинах волн 450, 480, 486, 546, 644, 656, 680, 930, 1100, 1300 и 1500 нмприменялся многоволновой рефрактометр АббеDR-M2\1550 (Atago, Япония), совмещённый с термостатом. Измерения проводились при комнатной температуре (20-22°C) и при температуре, близкой к температуре тела (37°C).

Формула Лорентц-Лоренца связывает показатель преломления вещества с электронной поляризуемостью молекул. В работе использовалось следующее представление волновой, температурной и плотностной зависимости функции Лорентц-Лоренца для водных растворов исследуемых веществ [4]:

$$\frac{n^2-1}{n^2-2}\frac{1}{\rho^*} = \alpha_0 + \alpha_1\rho^* + \alpha_2T^* + \alpha_3\lambda^{*2}T^* + \alpha_4/\lambda^{*2} + \frac{\alpha_5}{\lambda^{*2}-\lambda_{UV}^{*2}} + \frac{\alpha_6}{\lambda^{*2}-\lambda_{IR}^{*2}} + \alpha_7\rho^{*2}, (1)$$

где ρ — плотность вещества, г/мл;T — абсолютная температура, K; λ — длина волны, нм; λ_{UV} и λ_{IR} — резонансные длины волн, нм, $\rho^* = \rho/\rho_0$, $\lambda^* = \lambda/\lambda_0$, $T^* = T/T_0$, где $\rho_0 = 1$ г/м³; $\lambda_0 = 0.589$ нм; $T_0 = 273.15$ K; $\lambda_{UV} = 0.229202$; $\lambda_{IR} = 5.432937$.

С помощью формулы(1) рассчитывались коэффициенты α_0 , α_1 , ..., α_7 . Эти коэффициенты необходимы для получения значения коэффициента преломления раствора в зависимости от длины волны.

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости показателя преломления исследуемых растворов глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы от длины волны при температуре 37°C.

В таблицах 1 и 2 представлены коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов глюкозы при температурах 22°С и 37°С, рассчитанные с помощью формулы (1).

Таблица 1. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов глюкозы при температуре 22°C

	- JP =					
Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3		
10%	0.23371	0.02347	-6.8193×10^{-3}	-1.07116×10^{-3}		
20%	0.23464	0.02429	-5.94932×10^{-3}	-1.04917×10^{-3}		
30%	0.23448	0.02415	-6.09872×10^{-3}	-1.02996×10^{-3}		
40%	0.23471	0.02435	-5.88888×10^{-3}	-9.80063×10^{-4}		
50%	0.23512	0.02471	-5.50667×10^{-3}	-1.03485×10^{-3}		

Продолжение таблицы 1.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	2.94543×10^{-3}	166.59103	9.44443×10^4	-0.04612
20%	3.16442×10^{-3}	118.74854	6.71964×10^4	-0.04485
30%	3.31795×10^{-3}	126.10695	7.18932×10^4	-0.03977
40%	3.28878×10^{-3}	115.69401	6.53588 × 10 ⁴	-0.03757
50%	3.47692×10^{-3}	92.67269	5.31084×10^4	-0.03405

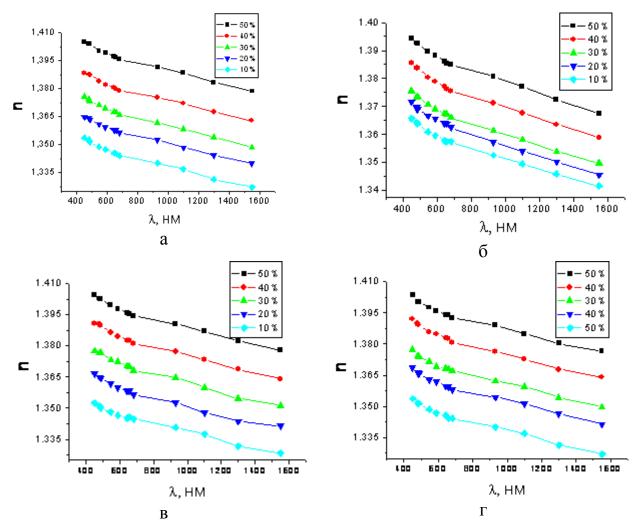


Рис. 1. Спектральные зависимости показателя преломления водных растворов глюкозы (а), фруктозы (б), сахарозы (в) и рибозы (г)с концентрациями 10, 20, 30, 40 и 50% при температуре 37°C.

Таблица 2. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов глюкозы при температуре 37°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.23241	0.02233	-8.03456×10^{-3}	-1.07015×10^{-3}
20%	0.23305	0.02289	-7.43724×10^{-3}	-1.08186×10^{-3}
30%	0.23425	0.02394	-6.31746×10^{-3}	-1.10216×10^{-3}
40%	0.234	1:0.02423	-6.01296×10^{-3}	-9.63365×10^{-4}
50%	0.23457	0.02423	6.01296×10^{-3}	-9.63365×10^{-4}

Продолжение таблицы 2.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	3.70317×10^{-3}	235.19526	1.33397×10^{5}	-0.04252
20%	3.26385×10^{-3}	201.91697	1.14631×10^{5}	-0.04012
30%	3.59863×10^{-3}	139.34797	7.91674×10^4	-0.0413
40%	3.69154×10^{-3}	122.06744	6.95775×10^4	-0.03794
50%	3.69154×10^{-3}	122.06744	6.95775×10^4	-0.03794

В результате исследований получено, что с увеличением длины волны показатели преломления исследуемых растворов уменьшаются во всем спектральном исследуемом диапазоне, что хорошо согласуется с общим видом спектральной зависимости показателя преломления. С увеличением концентрации раствора, коэффициенты функции Лорентц-Лоренца линейно возрастают, либолинейно убывают. Значения коэффициентов функции Лорентц-Лоренца слабо зависят от плотности и температуры вещества.

Работа поддержана грантом Президента РФ НШ-7898.2016.2.

Библиографический список

- 1 Wang J., Ma N., Shi R., Zhang Y., Yu T., Zhu D. Sugar-induced skin optical clearing: from molecular dynamics simulation to experimental demonstration // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 20(2), 7101007, 2014.
- 2 Feng W., Shi R., Ma N., Tuchina D.K., Tuchin V.V., Zhu D. Skin optical clearing potential of disaccharides // J. Biomed. Opt., Vol. 21(8), 081207, 2016.
- 3 *Genina, E.* Optical clearing of the eye in vivo caused by glucose / E. A. Genina, A. N. Bashkatov, Yu. P. Sinichkin, V. V. Tuchin // Quantum Electronics 36(12), P. 1119-1124, 2006.
- 4 Schiebener P., Straub J., Levelt Sengers J. M. H., Gallagher J. S. Refractive index of water and steam as function of wavelength, temperature and density // J. Phys. Chem., Vol. 19(3), P. 677-717, 1990.

СПОСОБ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗМА С ПОМОЩЬЮ СВЧ-АВТОДИННОГО ГЕНЕРАТОРА

Ю.В. Ветрова, А.А. Дорошенко, А.Э. Постельга, Д.А. Усанов Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского E-mail: vetrova.iulia2016@yandex.ru

В настоящее время применение излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона в диагностике и терапии находит широкое применение. Одним из направлений является мониторинг физиологических параметров человека, таких как дыхание и сердцебиение.

Автодинные генераторы находят широкое применение в качестве быстродействующих бесконтактных датчиков и измерителей параметров движения в приборах для экспериментальных исследований [1-3].

Принцип действия таких устройств основан на автодинном эффекте, заключающемся в изменении параметров автоколебаний генератора, возникающих при его взаимодействии с собственным излучением, отраженным от исследуемого объекта.

В данной работе предложено и проведено экспериментальное исследование метода определения функции, описывающей движения объекта, основанного на последовательном излучении и приеме отраженного от объекта электромагнитного СВЧ-сигнала по двум каналам, отличающиеся только электрической длиной, обеспечивающей сдвиг фаз интерференционных сигналов на $\pi/2$. При этом в качестве генератора СВЧ используют генератор, работающий в автодинном режиме, что, при соответствующих параметрах ослабления СВЧ каналов и уровнях отраженного сигнала, позволяет провести внутреннее или внешнее детектирование интерференционного сигнала, являющегося суммой падающего и отраженного электромагнитного излучения. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

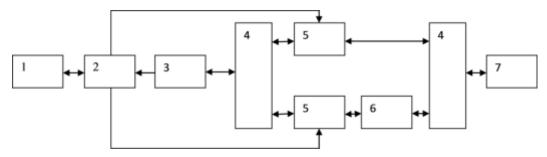


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 - блок управления и обработки сигналов. 2 - АЦП. 3 - автодинный генератор. 4 - делитель. 5 - pin аттенюатор. 6 - регулируемый фазовращатель. 7 – излучатель

Интерференционный сигнал в первом и втором канале представляют в виде:

$$A(t) = A_0 \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right)$$

$$B(t) = B_0 \sin \left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right), (1)$$

где t - время, θ - начальная фаза сигнала, λ - длина волны излучаемого электромагнитного СВЧ-сигнала, f(t) -функция, описывающая движение поверхности объекта. Полученные сигналы интерполируются, очищаются от шумов.

По измеренным значениям интерференционных сигналов можно определить полную фазу сигнала

$$\Phi(\mathsf{t}) = arctg\left(\frac{B(t)}{A(t)}\right). \ (2)$$

В силу того, что функция arctg вычисляется в пределах ($-\pi/2$, $\pi/2$), значения фазы не могут быть определены однозначно и будут испытывать скачки,

поэтому, продифференцировав полную фазу $\Phi(t)$, получим мгновенную частоту:

$$\omega(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[arctan \left(\frac{B(t)}{A(t)} \right) \right] = \frac{B'(t)A(t) - A'(t)B(t)}{A^2(t) + B^2(t)}.(3)$$

Полная фаза $\Phi(t)$ может быть определена через решение дифференциального уравнения численными методами, например, методом Эйлера:

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega(t).(4)$$

Таким образом, функция описывающая закон движения поверхности объекта, определяется как

$$f(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \Phi(t). (5)$$

Спектральный анализ полученной функции исследование ее частотных составляющих позволяют сделать выводы о различных параметрах жизнедеятельности организма.

По вышеизложенной методике проводилось восстановление формы движения отражателя, который совершал гармонические колебания с частотой 1,66 Гц и амплитудой 3 см. Восстановленная форма движения представлена на рис.2.А. Частота и амплитуда соответствуют заданным значениям. Также проводилось восстановление формы движения грудной клетки человека при частом дыхании. Восстановленная форма представлена на рис.2. Б.

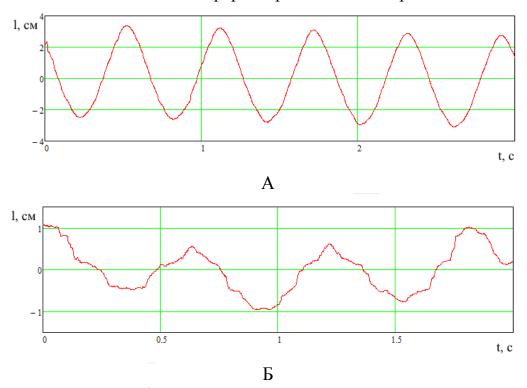


Рис. 2. А – восстановленная форма при гармоническом движении отражателя с частотой 1,66 Гц и амплитудой 3 см, Б – восстановленная форма движения грудной клетки человека при частом дыхании.

Таким образом, была показана возможность определения формы движения объекта и тем самым, осуществление дистанционного контроля биологического параметра человека, такого, как дыхание.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Постельга А. Э. Радиоволновая интерферометрия движений тела человека, связанных с дыханием и сердцебиением// Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. № 11-12. С 44-51.
- 2. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинкин М. Ю. Восстановление формы сложного движения объекта по сигналу автодинного детектирования полупроводникового лазера// ЖТФ. 2000. т. 70. вып. 2, С. 125-129.
- 3. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В., Постельга А. Э. Сверхвысокочастотный автодинный измеритель параметров вибраций. // Приборы и техника эксперимента, 2004, № 5, С. 130-134.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ГЛУБИНЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ В КОЖЕ ПРИ ОКТ - ВИЗУАЛИЗАЦИИ

С.М. Зайцев¹, Э.А. Генина², А.Н. Башкатов²

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

²Томский национальный исследовательский государственный университет E-mail: sergey.zaycev.1995@bk.ru

В результате многолетних исследований наночастиц было установлено, что они способны доставлять лекарства местного применения через кожный барьер. Успешная загрузка лекарств в наночастицы и их внедрение внутрь волосяного фолликула может представлять собой эффективный метод локализованной доставки лекарств. Окруженные густой сетью капилляров, волосяные фолликулы являются интересными целевыми структурами. Однако для повышения глубины детектирования частиц требуется применение методик, позволяющих увеличить контраст визуализации данных частиц [1]. Целями работы является исследование возможности увеличения глубины детектирования наночастиц в волосяном фолликуле с помощью оптической когерентной томографии (ОКТ) благодаря оптическому просветлению кожи.

В работе использовались пять лабораторных крыс альбиносов *exvivo* возрастом около 1 года весом 250-300 г. На каждом животном выделялись по два участка, экспериментальный и контрольный.

В качестве исследуемых частиц использовались частицы диоксида титана (TiO₂) (Sigma-Aldrich, США) диаметром 25 нм. Концентрация суспензий частиц

составляла 0.5 г/мл. В качестве основы суспензии для исследуемых частиц использовался полиэтиленгликоль 400 (ПЭГ-400).

В качестве иммерсионного агента использовалась многокомпонентная смесь ПЭГ-400 и диметилсульфоксида (ДМСО) в соотношении 80% и 20%, соответственно. Для оценки влияния ДМСО на повышение проницаемости кожи на одном животном в качестве иммерсионного агента использовался ПЭГ-400 без добавления ДМСО.

Суспензия частиц наносилась на предварительно депилированные экспериментальные участки кожи крысы и подвергалась воздействию УЗ частотой 1 МГц, мощностью 1 Вт в непрерывном режиме в течение 1 минуты. Затем суспензия удалялась, и на область воздействия наносился иммерсионный агент. На контрольные участки кожи наносился только иммерсионный агент. С помощью ОКТ (930 нм) проводился мониторинг изменения оптической глубины детектирования участков локализации наночастиц в фолликулах с интервалом 5 минут в течение 1 часа. На рис. 1 приведены ОКТ-изображения кожи крысы с локализованными в волосяных фолликулах частицами в разные моменты времени.

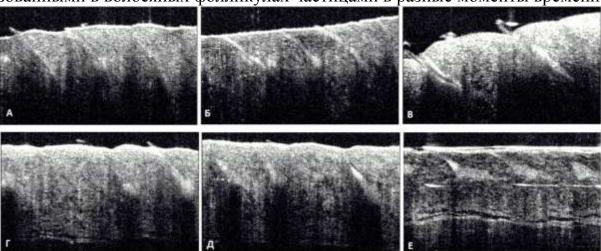


Рис. 1. ОКТ-изображения кожи крысы с локализованными в волосяных фолликулах частицами в разные моменты времени. Эксперимент с использованием смеси PEG-400 и ДМСО в качестве иммерсионного агента: участок кожи перед нанесением частиц (а), участок кожи после нанесения суспензии частиц с помощью УЗ (б), участок кожи после 1 часа просветления с помощью агента (в). Эксперимент с использованием PEG-400 в качестве иммерсионного агента: участок кожи перед нанесением частиц (г), участок кожи после нанесения суспензии частиц с помощью УЗ (д), участок кожи после 1 часа просветления с помощью агента (е)

По полученным А-сканам ОКТ-изображений была оценена оптическая глубина детектирования наночастиц.

Наибольшая оптическая глубина детектирования частиц в фолликулах при применении смеси ДМСО и ПЭГ-400 составила 354 мкм (через 55 мин). В контрольном эксперименте с применением только ПЭГ-400 в качестве иммерсионного агента глубина детектирования наночастиц составила 213 мкм (через 20 мин). В контрольной группе волосяные фолликулы в процессе оптического просветления полностью визуализировались.

Сравнение оптической глубины детектирования области локализации наночастиц в фолликулах при использовании в качестве иммерсионного агента ПЭГ-400 и смеси ПЭГ-400 и ДМСО показало, что в последнем случае глубина детектирования увеличилась более, чем в 1.5 раза. За время наблюдения оптическая глубина детектирования частиц при использовании ПЭГ-400 практически не изменилась, в то время как при использовании ПЭГ-400 в сочетании с ДМСО глубина постоянно увеличивалась.

Работа поддержана грантом Правительства Российской Федерации (14.Z50.31.0004) для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных.

Библиографический список

1. *LademannJ.,KnorrF., RichterH., et al.*, Hair follicles as a target structure for nanoparticles // J. Innov. Opt. Health Sci. 2015. Vol.8. P. 1-7.

ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОДОСОДЕРЖАЩИЕ СРЕДЫ И БИОБЪЕКТЫ

А.Д. Усанов Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: aka_norton@mail.ru

В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал по действию магнитного поля (МП) и электромагнитного излучения на различные биологические объекты [1-16]. При этом разнообразные биологические эффекты были отмечены на разных уровнях организации живых систем при исследовании широкого круга биообъектов. Механизм такого воздействия к настоящему времени достоверно не установлен. Поэтому представляются важным проведение разносторонних исследований подобного рода воздействия на различные показатели жизнедеятельности биологических объектов. Наблюдающиеся эффекты многие авторы связывают с изменениями свойств воды, которая входит в состав всех живых организмов.

Для оценки биологического действия МП на живые организмы было предложено использовать в качестве тест — объекта пресноводного рачка — дафнию (Daphnia magna Straus) [6,7], являющегося признанным при оценке состояния водной среды [6]. В работах [8,9] было показано, что магнитное поле частотой 6 Гц и индукцией 25 мТл изменяет частоту сердцебиений дафнии. В ряде работ при исследовании воздействия магнитного поля на биообъекты и среды их обитания не указывалось время воздействия. Нами установлена высокая значимость этого фактора на результат воздействия. Показано, что при воздействии переменного МП с индукцией, близкой по величине к индукции есте-

ственного магнитного поля Земли, для изменения частоты сердцебиений дафнии требуется значительно большее время [8].

Проведены исследования по воздействию МП на плодовитость дафнии [9]. Было установлено, что выраженный эффект повышения плодовитости наблюдался при частоте воздействующего МП 6 Гц с индукцией 25 мТл, при времени воздействия не менее 60 мин. В результате исследования воздействия низкочастотного МП на скорость роста одноклеточной водоросли Scenedesmus, установлено, что длительное культивирование водоросли (7-10 дней) в переменном МП с индукцией 25 мТл и частотой 6 Гц повышает скорость роста тестируемой культуры до 2,5 раз по сравнению с контрольным опытом, т.е. переменное магнитное поле с выбранными параметрами оказывает стимулирующее воздействие на рост одноклеточной водоросли Scenedesmus [10]. Проведенные исследования могут быть полезны для разработки методик повышения выхода биомассы микроводорослей, в частности, предназначенных для производства биотоплива. Кроме научной значимости при производстве биомассы этот фактор может иметь и экономическое значение.

Управление ростом и развитием растений – важнейшая прикладная задача. Применение для этих целей магнитных полей (МП) имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами воздействий (химическими, температурными, радиационными). Основой процессов роста и развития является пролиферация (размножение) клеток. Активацию пролиферативных процессов на ранних стадиях развития растений рассматривают как одну из причин повышения продуктивности возделываемых культур. В связи с этим особого внимания заслуживает поиск таких параметров МП, при которых происходит активация клеточных делений у проростков опытных растений. Выявлено, что такому условию удовлетворяют частоты из диапазона 1-12 Гц. Конкретные параметры, такие как частота, амплитуда МП, длительность и условия воздействия подбираются индивидуально для каждой культуры. Установлено, что МП может стимулировать повышение урожайности при воздействии на семена, проростки и луковицы. Урожайность лука-пера увеличивается на 11-16 %, сельдерея – на 32 %, редиса на 37-39 %. При воздействии МП укоренение черенков винограда происходит на 2 недели раньше, чем в контроле. Стимуляция клеточных делений имеет самостоятельное практическое значение для различных клеточных технологий, выход которых повышается при увеличении количества делящихся клеток. Общими чертами для всех рассмотренных серий экспериментов являются повторяемость результатов, однозначность их общей направленности стимуляции митотической активности), разные уровни этой стимуляции, в зависимости от используемых объектов и частот МП [11].

В работе [12] показано повышение всхожести семян, морфологических параметров проростков и митотической активности клеток апикальных меристем корней различных сельскохозяйственных культур после воздействия на них электромагнитного излучения (ЭМИ) терагерцового диапазона частот на одной из линий молекулярного спектра поглощения атмосферного кислорода

129±0,2 ГГц. Объектами исследования являлись семена популяции кукурузы Волгоградская и ПС (Пурпурная саратовская), сорго сортов Волжский 51 и Мелодия, суданской травы (Sorghum sudanense) и твердой пшеницы сорта Саратовская Золотистая. Авторами отмечалось, что наибольшим образом стимулирующий эффект ЭМИ проявлялся в увеличении всех исследуемых параметров семян кукурузы Волгоградская. На морфологические параметры проростков и митотическую активность клеток апикальных меристем корней других исследованных культур ЭМИ действовало либо угнетающе, так например, рост побегов проростков кукурузы линии ПС замедлился в 5,7 раза, а пшеницы сорта Саратовская Золотистая в 4,7 раза, либо не оказывало значимого воздействия на исследуемые показатели (суданская трава, Сорго Волжский 51, Сорго Мелодия).

Продемонстрирована принципиальная возможность визуализации кластерных структур, формирующихся в дистиллированной воде оптическими методами, основанными на анализе динамических спекл-структур. Впервые показано, что вопреки сложившимся представлениям, водные кластеры могут быть весьма велики, достигая размеров 200 мкм, а время их жизни может составлять десятки секунд. При этом установлено, что кластеры имеют внутреннюю пространственно-неоднородную структуру, которая постоянно изменяется во времени. Показано, что свойства намагниченной и ненамагниченной воды существенно отличаются. Так, в намагниченной воде количество образующихся кластеров в несколько раз больше, чем в том же объеме воды ненамагниченной [13].

Полученные результаты могут позволить более целенаправленно подойти к выявлению коррелятивных связей между физическими и химическими эффектами действия ПМП и специфическими биологическими реакциями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. *Пресман А.С.* Электромагнитные поля и процессы регулирования в биологии // Вопросы бионики. М.: Наука, 1967. 596 с.
- 2. *Казначеев В.П., Михайлова Л.П.* Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей. Новосибирск: Наука, 1985. 182 с.
- 3. Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.П. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев: Наук. думка, 1992. 188 с.
- 4. *Бинги В.Н., Савин А.В.* Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // УФН. 2003. Т. 177. № 3, С. 265-300.
- 5. Демецкий А.М., Алексеев А.Г. Искусственные магнитные поля в медицине. Минск: Беларусь, 1981. 94 с.
- 6. *Колупаев Б.И*. Метод биотестирования по изменению дыхания и сердечной деятельности у дафний // Методы биотестирования вод. Отв. ред. А.И. Крайнюкова Черноголовка, 1988. 103 с.

- 7. *Усанов Д.А.*, *Шишкин Г.Г.*, *Скрипаль А.В.*, *Усанов А.Д.* Влияние внешнего переменного магнитного поля на частоту сердцебиений пресноводного рачка дафнию // Биомедицинская радиоэлектроника. 2001, вып. 8. С.57-61.
- 8. *Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В., Усанов А.Д.* Воздействие переменных магнитных полей низкой интенсивности на частоту сердцебиений дафнии // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2003. №3. С.59-62.
- 9. *Усанов Д.А.*, *Скрипаль А.В.*, *Усанов А.Д.*, *Рзянина А.В.* Влияние низкочастотного магнитного поля на выживаемость и плодовитость пресноводного рачка Daphnia magna Straus // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2008. № 5. С. 51.
- 10. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Рзянина А.В., Усанов А.Д.* Воздействие переменного низкочастотного магнитного поля на рост одноклеточной водоросли Scenedesmus // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2009. № 3. С. 39.
- 11. Беляченко Ю.А. Пролиферация клеток растений при воздействии низкочастотного магнитного поля: дис. ... канд. биол. наук. Саратов, 2009. 112 с.
- 12. *Усанов А.Д.*, *Рытик А.П.*, *Пархоменко А.С.*, *Тырнов В.С.*, *Усанов Д.А*. Воздействие электромагнитного излучения терагерцевого диапазона частот на семена ряда сельскохозяйственных культур//Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 2. С. 53-56.
- 13. *Усанов А.Д., Ульянов С.С., Илюхина Н.С., Усанов Д.А.* Мониторинг изменений кластерных структур в воде, происходящих под воздействием переменного магнитного поля // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 1. С. 94-98.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДОСОДЕРЖАЩИХ ОБЪЕКТОВ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

А.Д. Усанов, А.Э. Постельга, Д.Г. Верхов Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: aka norton@mail.ru

В настоящее время проводятся исследования воздействия переменных магнитных полей (ПМП) как на воду и ее растворы, так и на различные биологические объекты, с целью изучения изменения физико-химических свойств воды, либо водных растворов под действием поля. В работе [1] с помощью волноводного СВЧ-метода было исследовано изменение таких характеристик водной среды как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь после воздействия на нее низкочастотного переменного магнитного поля. Было установлено, что максимальные изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды наблюдались в окрестности частоты воздействующего магнитного поля 10 Гц.

В работе [2] было проведено исследование влияния переменного магнитного поля на растворяющую способность воды на примере растворения соли сульфата меди (II). Было показано, что после воздействия ПМП с частотой из диапазона 1-10 Γ ц в течение часа, изменение пропускания Δ Т и плотность опытных растворов соли были выше по сравнению с контрольным раствором,

что свидетельствовало об увеличении растворимости соли. Однако не было исследовано влияние переменного магнитного поля на электрофизические характеристики водного раствора соли, такие как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь на СВЧ.

В работе [3] представлены результаты, устанавливающие взаимосвязь максимальных изменений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь семян сорго двуцветного на СВЧ с характеристиками воздействующего магнитного поля. Однако представляет интерес определение влияния низкочастотного переменного магнитного поля на характеристики широкого набора семян различных видов растений. Проведение таких исследований актуально, так как в результате могут быть определены частоты переменного магнитного поля, на которых эффект воздействия проявляется наибольшим образом.

Целью исследований было определить влияние переменного магнитного поля на электрофизические параметры на СВЧ водного раствора соли (на примере сульфата меди (II)) и семян различных видов растений.

Эксперименты проводились на насыщенных водных растворах соли сульфата меди (II), которые готовились с использованием дистиллированной воды в объёмах по 20 мл с добавлением соли массой 6 г для поддержания в них концентрации, соответствующей насыщенному раствору в условиях термостатирования. Приготовленные водные растворы соли обрабатывались переменным магнитным полем из диапазона частот 2-22 Гц с индукцией 50 мТл в течение 1 часа. Более детальное описание установки для воздействия переменным магнитным полем приведено в работе [4]. На контрольные растворы с той же концентрацией соли воздействие переменным магнитным полем не оказывали.

В результате экспериментов были получены зависимости изменения величин диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь растворов соли от частоты воздействия переменного магнитного поля (рис. 1). Представленные на графиках значения $\Delta \varepsilon$ и $\Delta t g \delta$ были рассчитаны как разности значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для опытного и контрольного растворов соответственно.

Из рис. 1 видно, что в диапазоне частот магнитного поля 2-10 Γ ц значения диэлектрической проницаемости для опытных растворов превышали значения диэлектрической проницаемости контрольного раствора. При увеличении частоты воздействующего переменного магнитного поля наблюдалось уменьшение абсолютного изменения диэлектрической проницаемости. При воздействии на растворы ПМП с частотами из диапазона 11-22 Γ ц значения ε опытных растворов были меньше контрольных, а при повышении частоты воздействующего магнитного поля наблюдалось увеличение абсолютного изменения ε . Данные результаты можно связать с влиянием ПМП на состояние водных структур, имеющихся в составе исследуемых растворов. В нашем случае, при частоте магнитного поля 2 Γ ц молекулы воды, возможно, оказываются менее всего ассоциированы между собой, вследствие чего происходит увеличение

растворяющей способности воды, а, следовательно, и изменение электрофизических параметров раствора. Максимальное изменение ε опытного раствора относительно контрольного наблюдалось при обработке водного раствора ПМП частотой 2 Γ ц и составляло \sim 0.24, а максимальное изменение $tg\delta$ — \sim 0.017. Полученные результаты коррелируют с результатами, изложенными ранее в работе [2].

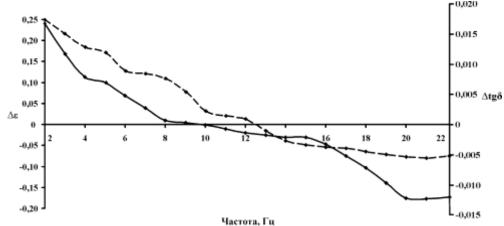


Рис. 1. Зависимости изменения величин диэлектрической проницаемости (сплошная кривая) и тангенса угла диэлектрических потерь(штриховая кривая) раствора соли сульфата меди (II) от частоты воздействия переменного магнитного поля

Другие экспериментальные исследования были связаны с определением влияния переменного магнитного поля на диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь на СВЧ семян различных видов растений. На рис. 2 представлены зависимости величин диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для семян кукурузы гибрид ЭСИ 29/1 от частоты воздействия переменного магнитного поля.

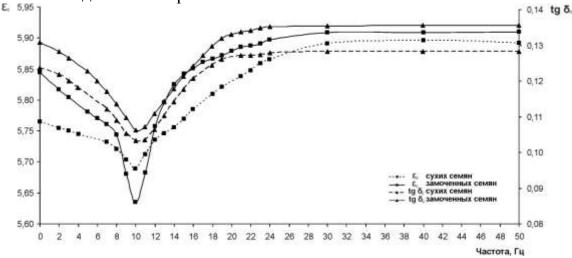


Рис. 2. Зависимости величин диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь семян кукурузы гибрид ЭСИ 29/1 от частоты воздействия переменного магнитного поля

В результате было установлено, что максимальные изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для сухих и замоченных семян кукурузы гибрид ЭСИ 29/1 наблюдались при воздействии переменного магнитного поля с частотой 10 Гц. Это может свидетельствовать о стимулирующем эффекте действия магнитного поля на замоченные семена, так как согласно результатам работы [5], в окрестности частоты переменного магнитного поля 10 Гц у семян некоторых растений наблюдалось повышение митотической активности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Усанов А.Д. Изменение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды на СВЧ при совместном воздействии низкочастотного и постоянного магнитных полей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12, № 1. С. 34-38.
- 2. Усанов А.Д., Ребров В.Г., Верхов Д.Г. Влияние переменного низкочастотного магнитного поля на растворяющую способность воды // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. №2. С. 55-58.
- 3. Постельга А.Э., Усанов А.Д., Беляченко Ю.А., Тырнов В.С., Усанов Д.А. Влияние переменного магнитного поля низкой интенсивности на физические характеристики зерновок сорго // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11, №1. С. 65-69.
- 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. Беляченко Ю.А. Пролиферация клеток растений при воздействии низкочастотного магнитного поля: дис. ... канд. биол. наук. Саратов, 2009. 112 с.

УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА *INVIVO*

Д.К. Тучина, ¹ П.А. Тимошина, ¹ А.Н. Башкатов, ^{1,2}, Э.А. Генина^{1,2}, В.В.Тучин^{1,2,3}

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

²Томский национальный исследовательский государственный университет ³ Институт проблем точной механики и управления РАН E-mail: tuchinadk@mail.ru

Кожа имеет сложную неоднородную структуру, поэтому для нее характерно сильное светорассеяние, что ограничивает применимость оптических методов диагностики и лечения различных кожных и ряда других заболеваний. Для снижения рассеяния света в коже применяется метод оптического иммерсионного просветления, принцип которого основан на частичном замещении внутритканевой жидкости биосовместимым гиперосмотическим иммерсион-

ным агентом. При таком замещении имеет место согласование показателей преломления компонентов ткани и окружающей их внутритканевой жидкости, более регулярная упаковка компонентов ткани, что и приводит к снижению рассеяния света в ткани, и, соответственно, увеличению глубины зондирования кожи излучением видимого и ближнего ИК спектрального диапазона. Одной из проблем, возникающих при поверхностном введении иммерсионных агентов, является защитная функция верхнего слоя кожи: так называемого рогового слоя, препятствующего проникновению данного агента в глубокие слои кожи, которые и определяют ее оптические характеристики. Одним из существующих методов, увеличивающих скорость проникновения иммерсионного агента в дерму кожи, является механическое удаление рогового слоя кожи.

Целью данной работы являлось исследование возможности повышения эффективности оптического просветления кожи человека*in vivo* при частичном механическом удалении ее рогового слоя.

Для оценки эффективности оптического просветления кожи проводилось сканирование кожи человека *in vivo* с помощью оптического когерентного томографа (ОКТ) SpectralRadarOCTSystemOCP930SR 022 (Thorlabs Inc., США) на длине волны 930 нм. Ширина спектральной полосы составляла 100 нм, выходная мощность – 2 мВт, оптическая глубина сканирования – 1.6 мм, разрешение системы по глубине на воздухе было равно 6.2 мкм. Измерения проводились на участке кожи с внутренней стороны предплечья добровольцев. В измерениях участвовало 20 добровольцев, возраст которых составлял 19-21 год.

В первой серии экспериментов с исследуемой области с помощью одного отрыва медицинской клейкой ленты частично снимался верхний роговой слой эпидермиса (3-5 мкм) по технологии, принятой в косметологии при глубокой чистке кожи. Запись сканов с исследуемой области проводилась перед снятием рогового слоя, затем перед нанесением иммерсионного агента, после чего наносился агент, и запись сканов производилась каждые 5 минут во время действия агента, процедура записи повторялась в течение 35 минут. Во второй серии экспериментов снятия рогового слоя не производилось, запись ОКТ изображений производилась способом аналогичным описанному выше.

В качестве иммерсионного агента использовался полиэтиленгликоль с молекулярным весом 400 дальтон (ПЭГ-400). Показатель преломления ПЭГ-400, измеренный на многоволновом рефрактометре Аббе DR-M2/1550 (АТАGO, Япония) на длине волны 930 нм, был равен 1.4158.

Записанные ОКТ сканы использовались для расчета кинетики изменения коэффициента ослабления света в коже, из анализа которой производилась оценка эффективности оптического просветления кожи.

Коэффициент ослабления света μ_t в коже в момент времени t определяется при аппроксимации зависимости интенсивности отраженного света I(z) от глубины исследуемой области z А-скана, записанного в момент времени t, с помощью уравнения:

$$I(z) = A_D \exp(-\mu_t z) + y_0$$
.

Глубина исследуемой области составляла 1.1 мм.

Эффективность оптического просветления кожи оценивалась как отношение разницы между минимальным $\mu_{r min}$ и начальным $\mu_{r o}$ значениями коэффициента ослабления света к начальному значению коэффициента ослабления света:

$$OC_{eff} = \frac{\mu_{to} - \mu_{t min}}{\mu_{to}} \cdot 100\%$$
.

На рис. 1 представлены типичные зависимости коэффициента ослабления света в коже от времени оптического просветления кожи под действием ПЭГ-400 без снятия рогового слоя (а) и после снятия рогового слоя (б). Из представленных графиков видно, что в обоих случаях коэффициент ослабления света снижается, что свидетельствует о снижении рассеяния света в коже.

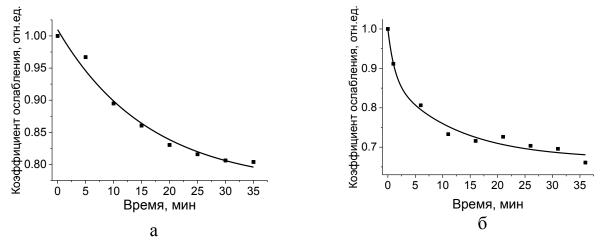


Рис.1. Зависимость коэффициента ослабления света в коже от времени воздействия ПЭГ-400 без снятия рогового слоя (а), после снятия рогового слоя (б).

Эффективность оптического просветления кожи без снятия рогового слоя составила 37%, при снятии рогового слоя - 41%. Таким образом, после снятия рогового слоя было получено более эффективное оптическое просветление кожи.

Работа поддержана грантом Президента РФ НШ-7898.2016.2.

4 ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР «АЛМАЗ-ФАЗОТРОН»: ОПЫТ НЕСКОЛЬКИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЕЦИМЕТРОВОГО, САНТИМЕТРОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН

В.С. Тяжлов, В.Н. Посадский АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов E-mail: afazotron@volgaline.ru

Представлена краткая история создания и становления одного из динамично развивающихся предприятий радиоэлектронной отрасли — АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (г. Саратов). Приведены результаты разработки и освоения в серийном производстве синтезаторов сигналов, усилителей, преобразователей, приемно-передающих устройств и других изделий СВЧ-диапазона. Отмечены некоторые тенденции развития конструкций и технологии изготовления многофункциональных СВЧ-устройств.

АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» ведет свою историю от отдела твердотельной электроники, созданного в ГНПП «Алмаз» в 1971 году, на базе которого образовался НПК-2, в 90-е годы преобразованный в НПП «Микроэлектроника» [1].

Проведённые тогда научные исследования и конструкторские работы позволили разработать и внедрить в производство уникальную технологию проектирования и изготовления СВЧ-полупроводниковых изделий и полосковых микросхем с применением электронно-лучевой литографии: транзисторные приборы из арсенида галлия; фильтры, СВЧ-линии задержки, стабильные генераторы на поверхностных и объёмных волнах в кристалле; широкополосные и сверхширокополосные транзисторные усилители на полевых транзисторах в диапазоне от 1 до 18 ГГц, ограничители мощности и синтезаторы частот с параметрами на уровне лучших мировых образцов. За разработку и внедрение новейшей полупроводниковой технологии, организацию серийного производства упомянутых изделий, ставших основой систем управления вооружением и движением летательных аппаратов (в т.ч. самолётов МиГ-29, Су-27), в 1987 г. Эдгар Александрович Семёнов и Виктор Николаевич Посадский, а в 1988 г. Валерий Павлович Густерин и Эдуард Владимирович Мичурин были удостоены Государственной премии СССР.

В настоящее время в АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» функционируют основные технологические комплексы современной твердотельной СВЧ-

электроники: подразделения компьютерного проектирования гибридно-интегральных схем и модулей на их основе; шаблонный комплекс с участком электронной литографии на базе установки ZBA-20; комплекс производства монолитных СВЧ-приборов; цех по производству гибридно-интегральных схем на базе поликора с участками вакуумного напыления, фотолитографии, гальванического и химического осаждения металлов, резки и лазерной прошивки отверстий; сборочно-испытательный цех, оснащенный необходимым технологическим оборудованием; участки динамического прогона изделий, испытаний их на долговечность, виброударную устойчивость, акустические и климатические воздействия; цех механообработки с участком станков ЧПУ.

Потребителями продукции НПЦ «Алмаз-Фазотрон» являются ведущие предприятия — разработчики и производители радиоэлектронной аппаратуры страны.

Изделия предприятия демонстрировались на многих международных авиасалонах, в том числе в Ле Бурже, Фарнборо, Жуковском, Дубаи, Куала-Лумпур, как в составе авиационных комплексов, так и в отдельной экспозиции.

Исторически первым и до настоящего времени важнейшим направлением деятельности предприятия стало создание синтезаторов сигналов, принципы конструирования которых сформировались в 70-е годы прошлого столетия. В это время происходило бурное развитие твердотельной электроники, целью которого было создание набора компактных быстродействующих устройств различного функционального назначения (устройства управления амплитудой и фазой сигналов, линии задержки, детекторы, малошумящие усилители), в том числе формирователей «сетки» частот задающих генераторов РЛС при сохранении за вакуумными приборами ведущей роли в формировании мощного выходного сигнала локатора.

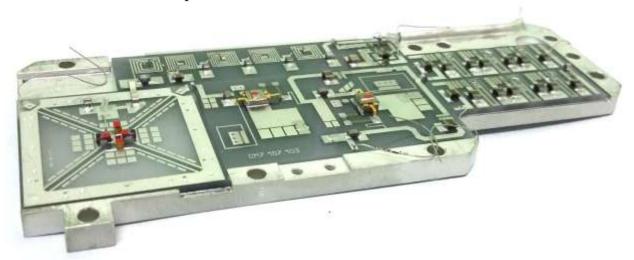


Рис. 1 Узел смесителя дм-диапазона длин волн

Первый спроектированный коллективом синтезатор работал в сантиметровом диапазоне длин волн, количество значений синтезируемых частот насчи-

тывало несколько десятков, их относительная нестабильность составляла 5 10^{-5} , выходная мощность не превышала 20 мВт, уровень частотных флуктуаций определялся параметрами внешнего опорного генератора (собственный опорный генератор в составе изделия отсутствовал). Синтезатор выполнялся с использованием только дискретных корпусных элементов (в качестве усилительных приборов использовались биполярные транзисторы), которые включались в микрополосковые линии передачи, формируемые нанесением меди и сплава олово—вимут на подложки из Al_2O_3 (поликор). Внешний вид типичного функционального узла, изготовленного по данной технологии, представлен на рис.1. В целом изделие представляло собой конструкцию, размещенную в едином корпусе, при этом узлы размещались на верхней и нижних сторонах разделительной перегородки.

Дальнейшее совершенствование устройств было связано с переходом в сантиметровый диапазон длин волн с одновременным расширением рабочей полосы частот, увеличением количества синтезируемых значений частот сигнала (до нескольких сотен), увеличением скорости их переключения, повышением выходной мощности до сотен милливатт и единиц ватт, включением в состав синтезатора собственного опорного генератора, доведением относительной нестабильности частоты сигналов до 10^{-7} , обеспечением возможности амплитудной, фазо-кодовой, линейной частотной модуляций выходного сигнала.

Достижение данных показателей потребовало применения бескорпусных активных элементов, дискретных и частично изготовленных по технологии монолитных интегральных схем (основным усилительным элементом становится GaAs полевой транзистор с барьером Шотки), поликора толщиной 0,5 мм и 0,25 мм, изготовление проводников микрополосковых линий передачи со структурой «хром-медь-никель-золото».

Конструктивно изделия представляют собой набор отдельных функционально законченных модулей, каждый из которых имеет собственный герметичный корпус, жёстко скрепленных между собой и соединенных СВЧ-кабелями и кабелями подачи управляющих команд и напряжения питания. Такой подход позволяет оптимизировать значения параметров, относящихся к различным функциям изделия, улучшить контроль качества, упростить возможность ремонта, выполнить жесткие требования к электромагнитной совместимости, как функциональных узлов, входящих в состав изделия, так и изделия в целом [2].

Одновременно стала прослеживаться тенденция внедрения твердотельных приборов в передатчики на основе ЛБВ, сначала в качестве устройств формирования амплитуды и фазы их входных сигналов, а затем и в качестве входных и предвыходных каскадов (так называемые «вакуумно-твердотельные» модули). Не осталось в стороне от этой тенденции и предприятие «Алмаз-Фазотрон». На рубеже 90-х и 2000-х годов была разработана конструкция сверхширокополосного усилителя-корректора амплитудно-частотной характеристики с выходной мощностью до 300 мВт на нижнем и верхнем краях диапа-

зона частот с уменьшением ее на 15-20 дБ в середине диапазона, что позволило сформировать входной сигнал с изменением амплитуды, компенсирующим уменьшение коэффициента усиления ЛБВ в середине ее рабочего диапазона частот [3]. На рис. 2 показан узел выходного каскада усилителя-корректора, аналогичным образом выполнялись функциональные узлы, применяемые в синтезаторах данного периода времени.

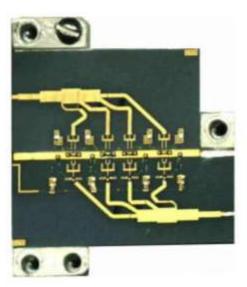


Рис.2 Выходной каскад сверхширокополосного усилителя с использованием 4-канального усилителя-сумматора «бегущей волны»

Современное поколение твердотельных приборов, включая синтезаторы, разрабатываемых АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» характеризуется продвижением в миллиметровый диапазон длин волн, увеличением выходной мощности до десятков и сотен ватт, возможностью использования в синтезаторах, помимо собственных высокостабильных опорных генераторов, внешних «стандартов частоты», объединением в едином приемо-передающем устройстве синтезатора, выходного твердотельного усилителя и приемника, существенным ужесточением требований к массо-габаритным характеристикам. В конструкции узлов применяются корпусные активные многофункциональные элементы, изготовленные по технологии монолитных интегральных схем, в качестве подложек используются многослойные структуры из композитных материалов (см. рис. 3). Изделия в целом часто имеют однокорпусную конструкцию.

Направления дальнейшего развития связаны с освоением 3-миллиметрового диапазона длин волн [4], необходимого, в частности, для создания аппаратуры обеспечения полетов в условиях ограниченной видимости, доведением выходной мощности до единиц киловатт, что позволит полностью вытеснить вакуумные изделия из выходных устройств передатчиков, дальнейшим уменьшением массы и габаритов с целью размещения аппаратуры на беспилотных летательных аппаратах.

Успешное продвижение в указанных направлениях возможно при использовании объемных интегральных схем на основе многослойных керамических структур (рис.4).

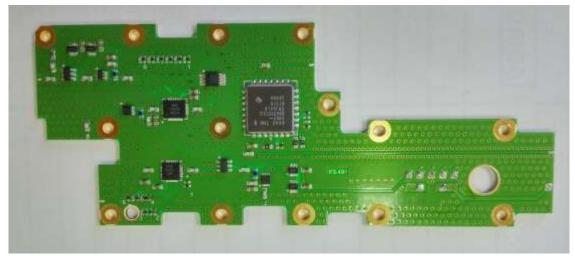


Рис.3 Многофункциональная сборка (преобразователь 8-мм диапазона длин волн, устройства управления амплитудой и фазой, переключатель) на подложке из материала «RO 4003»



Рис. 4 Узел из состава приемо-передающего модуля 3-см диапазона длин волн, выполняющий функции аттенюатора, фазовращателя и усилителя, изготовленный на основе 7-слойной керамики.

Библиографический список

- 1. Посадский В.Н. ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (г. Саратов) 15 лет// Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2012, вып. 3 (514) с.46-49
- 2. *Семенов Э.А.* Современные блоки формирования СВЧ-сигналов для бортовых РЛС. О «НПЦ «Алмаз-Фазотрон»// Аэрокосмическое обозрение. 2011, т.4, с 66-67.
- 3. *Тяжлов В.С., Бегинин Д.В., Бутерин А.В.* Сверхширокополосный транзисторный усилитель со специальной формой амплитудно-частотной характеристики, предназначенной для работы в составе мощного вакуумно-твердотельного модуля// Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2003, вып. 2 (482), с. 74-78.
- 4. *Веденеев И.О., Жулидов Е.В.* Разработка четырехканального приемно-преобразующего устройства 8-мм диапазона с защитой по входу оси синхронных и асинхронных сигналов мощностью до 30 Вт в импульсе// В сб. XII Всероссийская научнотехническая конференция «Пульсар-2013»., 24-25 октября 2013.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНЫХ ДИАФРАГМ С НАРУШЕНИЕМ ПЕРИОДИЧНОСТИ В ВИДЕ *n-i-p-i-n-*ДИОДНОЙ МАТРИЦЫ

Д.А. Усанов¹, С.А. Никитов², А.В. Скрипаль¹, М.К. Мерданов³, С.Г. Евтеев¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского» ²Институт радиотехники и электроники им.В.А. Котельникова РАН, г. Москва ³ АО «НПО «Электронное приборостроение», г. Москва E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Структуры с брэгговской запрещенной зоной в СВЧ-диапазоне, часто называемые СВЧ фотонными кристаллами, обладают свойствами, обеспечивающими возможность создания различных типов СВЧ-устройств, среди которых полосовые фильтры, направленные ответвители, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны, согласованные нагрузки. Для создания СВЧ фотонных кристаллов использовались прямоугольные и коаксиальные волноводы, микрополосковые, копланарные, щелевые и волноводно-щелевые линии [1–7].

Известно, что резонансные волноводные диафрагмы являются часто применяемыми элементами конструкции аттенюаторов и выключателей на p–i–n-диодах. Малые геометрические размеры щели обеспечивают эффективное вза-имодействие полупроводниковых элементов, имеющих малые габариты, с полем волновода, поэтому рассмотрение свойств фотонных кристаллов на волноводных резонансных диафрагмах представляет значительный интерес для разработчиков электронных устройств.

Исследуемый фотонный кристалл представлял собой структуру, состоящую из семи периодически расположенных прямоугольных металлических резонансных диафрагм на расстоянии L=20 мм друг от друга в прямоугольном волноводе трехсантиметрового диапазона. Ширина и высота щелей диафрагм фотонного кристалла выбирались равными 20 мм и 2 мм, соответственно.

Для управления резонансными свойствами таких фотонных кристаллов использовалась n-i-p-i-n-диодная матрица, состоящая из четырех диодных элементов, размещенных в центральной диафрагме, выполненной в виде двух прямоугольных щелей. Размеры каждой щели составляли $10.5 \times 1.0 \text{ мм}^2$. Конструкция фотонного кристалла с n-i-p-i-n-диодной матрицей, выполняющей роль нарушения с управляемыми током характеристиками, представлена на рис. 1.

При расчете полагалось, что полупроводниковая матрица состоит из n-i-p-i-n-структур, имеющих форму параллелепипеда высотой h=1 мм и поперечным сечением 1.0×0.5 мм².

На основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в программе ANSYS HFSS исследовались амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения и прохождения фотонного кристалла при различной удельной электропроводности i-слоя n-i-p-i-n-структуры.

Предполагалось, что при прямом смещении удельная электропроводность σ данного элемента изменялась в диапазоне $10^{-2}...10^5$ См/м.

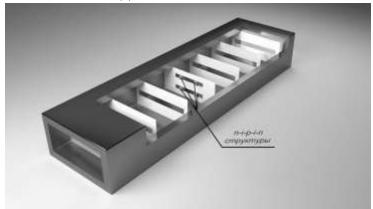


Рис. 1. Конструкция фотонного кристалла с *n-i-p-i-n-*диодной матрицей

Результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла представлены на рис. 2.

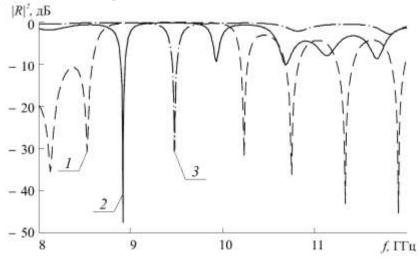


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла, 1 — фотонный кристалла без нарушений из 7 диафрагм без n—i—p—i—n-матрицы, 2, 3 — фотонный кристалл с управляющей n—i—p—i—n-матрицей в качестве нарушения центрального слоя при различной удельной электропроводности i-слоя n—i—p—i—n-структуры σ , См/м: 2—0.4, 3—1000

Как следует из результатов расчета фотонный кристалл без нарушений, созданный на основе резонансных диафрагм, характеризуется наличием запрещенной зоны в диапазоне частот $8.53...10.23~\Gamma\Gamma$ ц (кривая I на рис. 2). Введение в фотонный кристалл n-i-p-i-n-матрицы в качестве нарушения центрального слоя приводит к возникновению примесной моды колебаний в запрещённой зоне фотонного кристалла на частоте $f_{1\text{теор}}=8.91~\Gamma\Gamma$ ц (кривая 2 на рис. 2). Увеличение удельной электропроводности i-слоя n-i-p-i-n-структуры до значений больших 20.0~См/м приводит к исчезновению примесной моды колебаний на частоте $f_{1\text{теор}}$ и её возникновению на частоте $f_{2\text{теор}}=9.47~\Gamma\Gamma$ ц, отличной от $f_{1\text{теор}}$.

Частотные зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла демонстрируют высокую чувствительность к величине удельной электропроводности i-слоя n-i-p-i-n-структуры.

Экспериментально исследовался фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной выше моделью. В фотонном кристалле в центральной диафрагме в качестве нарушения с управляемыми характеристиками была размещена n-i-p-i-n-матрица из диодов типа 2A505. Увеличение тока, протекающего через n-i-p-i-n-структуру, до значений больших 1.0 мА приводило к исчезновению примесной моды колебаний на частоте $f_{19\text{ксп}}$ =9.22 ГГц и возникновению на частоте $f_{29\text{ксп}}$ =9.56 ГГц. При этом на частоте $f_{29\text{ксп}}$ с увеличением протекающего через n-i-p-i-n-структуру тока в диапазоне от 0.0 См/м до 8.15 мА коэффициент отражения уменьшался от -0.1 дБ до -48.64 дБ. Дальнейшее увеличение управляющего тока приводило к монотонному росту коэффициента отражения на частоте $f_{29\text{ксп}}$.

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами численного расчета и свидетельствуют о возможности создания на основе фотонного кристалла на резонансных диафрагмах электрически управляемого модулятора и переключателя СВЧ-сигнала в схеме на отражение. При этом на частоте f_{1 эксп возможна реализация прямого режима переключения, то есть увеличение коэффициента отражения при пропускании тока через n-i-p-i-n-структуру, и на частоте f_{2 ксп прямого и инверсного, сопровождающегося уменьшением коэффициента отражения при протекании тока, режимов переключения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. *Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M.* Microwave applications of photonic crystals // Progress In Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, pp. 185–209.
- 2. Schneider G. J., Hanna S., Davis J. L., Watson G. H. Defect modes in coaxial photonic crystals // Journal of Applied Physics, 2001. V. 90, N 6. September. P. 2642–2649.
- 3. *Мухортов В.М., Масычев С.И., Маматов А.А., Мухортов Вас.М.* Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 20, с. 70–76.
- 4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей // ЖТФ. 2010, том 80, вып. 8, с. 143–148.
- 5. Никитин Ал.А., Никитин Ан.А., Устинов А.Б., Lähderanta Е., Калиникос Б.А. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой // ЖТФ. 2016, том 86, вып. 6, стр.115–120.
- 6. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С. Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно-щелевых линиях // Радиотехника и электроника. 2016, том. 61. № 4. С. 321–326.
- 7. Усанов Д.А., Мещанов В.П., Скрипаль А.В., Попова Н.Ф., Пономарев Д.В., Мерданов М.К. Согласованные нагрузки сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на СВЧ фотонных кристаллах // ЖТФ, 2017, том 87, вып. 2. С. 216–220.

МНОГОПАРАМЕТРОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА СВЧ

К.А. Гуров, Д.А. Усанов, А.Э. Постельга, Е.Ю. Дмитриева Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: kirill.gurov93@mail.ru

Для определения электрофизических параметров полупроводниковых материалов и структур могут быть использованы результаты измерения спектров отражения взаимодействующего с ними сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения при условии, что известно их теоретическое описание и возможно решение соответствующей обратной задачи [1].

Для одновременного измерения толщины слоя полупроводника d_{nn} , электропроводности σ , энергии активации легирующей примеси ΔW , эффективной массы носителей заряда $m_{n,p}^*$, коэффициентов рассеяния носителей заряда на фононах b и ионах примеси a и концентрации легирующей примеси n0 и ионах примеси n1 измерения частотных зависимостей коэффициента отражения n2 излучения при ряде различных температур: от значения, для которого характерно изменение электропроводности за счет ионизации примеси, до значения, для которого характерно преимущественное рассеянии носителей заряда на фононахи использовать известные соотношения для температурных зависимостей концентрации и подвижности носителей заряда n3 и, тем самым, исключить возможность появления неоднозначности в определении искомых параметров по спектру отражения.

Для нахождения значений электропроводности (σ) и толщины слоя полупроводника (d_{nn}) по спектрам отражения электромагнитного излучения $R_{exp0}(\omega_i)$ и $R_{exp1}(\omega_i)$ был использован метод наименьших квадратов [3], в котором находилась комбинация σ и d_{nn} , при которой достигалось минимальное значение функции невязок, вида:

$$S_2(\sigma) = \sum_{i} \left[R_{teor}(T_0, \omega_i, \sigma, d_{nn})^2 - R_{exp}(\omega_i)^2 \right]^2,$$

где $R_{exp}(\omega_i)$ и $R_{teor}(T_0,\omega_i,\sigma,d_{nn})$ — экспериментально измеренный и рассчитанный теоретически спектры отражения. При помощи данного методабыла получена температурная зависимость электропроводности образца $\sigma_{exp}(T_i)$ (1 на рис.1), необходимая для определения остальных параметров.

С учетом температурных зависимостей концентрации и подвижностей носителей заряда и формулы, учитывающей воздействие двух механизмов рассеяния [2], была получена зависимость определяющая электропроводность образца в виде:

$$\begin{split} &\sigma(T) \\ &= \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot N \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \hbar^2}{m_d^* \cdot k \cdot T}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{k \cdot T}\right)}}{\frac{3\sqrt{2} \cdot N \cdot E_l^{\ 2} \cdot m^{*\frac{5}{2}} \cdot (k \cdot T)^{\frac{3}{2}}}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \hbar^4 \cdot c_l \cdot E^{*^{-\frac{1}{2}}}}} + \frac{N^2 \cdot \pi^{\frac{3}{2}} \cdot e^4 \cdot \sqrt{m^*} \cdot g(T)}{2\sqrt{2} \cdot \varepsilon_L^2 \cdot \left(\frac{3 \cdot k \cdot T}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot N \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \hbar^2}{m_d^* \cdot k \cdot T}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{k \cdot T}\right)}\right)} \end{split}, (1) \end{split}$$

где \hbar — приведенная постоянная Планка, $c_l=16.6\cdot 10^{10}$ Н/м² — упругая постоянная кристалла при продольных колебаниях [4], ΔW — энергия активации примеси, E^* — приведенная энергия рассеиваемого электрона, $E_l\approx 7$ эВ — константа деформации потенциала [5], m^* — эффективная масса электропроводности носителей заряда, m_d^* — эффективная масса плотности состояний, k — постоянная Больцмана, N — концентрация примеси, $N_{V,C}(T)=2(2\cdot\pi\cdot m_{n,p}^*\cdot k\cdot T/(2\cdot\pi\cdot\hbar)^2)^{3/2}$ — эффективная плотность состояний в валентной зоне $N_V(T)$ для образца р—типа или эффективная плотность состояний в зоне проводимости $N_C(T)$ для образца п—типа, ε_L — диэлектрическая проницаемость решетки, $g(T)=\ln(1+\eta(T))--\eta(T)/(1+\eta(T))$, $\eta(T)=3\cdot m_{n,p}^*\cdot k^2\cdot T^2\cdot \varepsilon/\pi\cdot\hbar^2\cdot e^2\cdot n, p(T)$.

Для нахождения значений m^* , b, $N_{\rm A}$ или $N_{\rm D}$ и ΔW был также применен метод наименьших квадратов, но с функцией невязок вида

$$S_3(b, m^*, N, \Delta W) = \sum_{i} \left[\sigma_{teor}(T_i, b, m^*, N, \Delta W)^2 - \sigma_{exp}(T_i)^2 \right]^2,$$

где $\sigma_{\exp}(T_i)$ - экспериментально определенные значения электропроводности, $\sigma_{teor}(T_i, b_1, m^*, N, \Delta W)$ - расчетные значения, получаемые из соотношения (1). Набор искомых параметров определялся с использованием численных итерационных методов на ЭВМ.

Проведенный модельный эксперимент показал, что наибольшая точность и чувствительность функции невязок к искомым параметрам достигается в температурном диапазоне, средним значением которого является температура полной ионизации примеси (4 на рис. 1), а крайними — значения температур, равно отстоящие от температуры полной ионизации примеси в области пониженных и повышенных температур (3, 5 на рис. 1).

В качестве исследуемых образцов были выбраны кремний, легированный бором ($\Delta W_B = 0.045$ эВ [6]), а в качестве диэлектрика был выбран фторопласт. Температуру изменяли с применением жидкого азота и регистрировали с помощью термопары.

На рис. 1 представлена, рассчитанная по результатам экспериментальных измерений, температурная зависимость электропроводности образца р—типа 1 и расчетная 2, построенная с использованием значений параметров полупроводника, определенных предлагаемым методом.

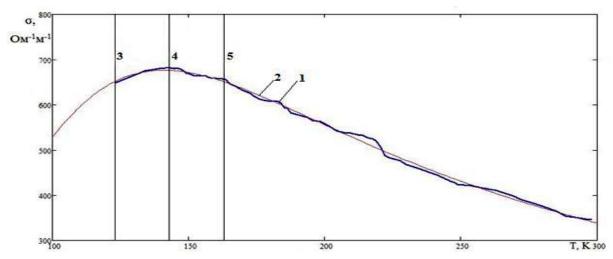


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности образцар—типа: 1 — экспериментальная, 2 — полученная расчетным путем; 3, 5 —границы физически значимого диапазона температур; 4 — температура полной ионизации примеси

Полученные в работе результаты как компьютерного, так и натурного эксперимента свидетельствуют о принципиальной возможности применения описанного метода для контроля параметров полупроводниковых планарных структур. Описанный метод позволяет одновременно определить параметры полупроводникового слоя, а именно, электропроводность, толщину, эффективную массу, коэффициенты рассеяния носителей заряда, концентрацию и энергию активации легирующей примеси с помощью стандартной СВЧ–аппаратуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Сысоев Н.Ю. Определение электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения// Известия вузов. Электроника, 2011, N4, с.71–77.
- 2. Φ истуль В.И. Введение в физику полупроводников, 2—е изд., перераб. и доп.//М.: Высш. шк., 1984.-352 с.
- 3. Усанов Д.А., Постельга А.Э. Определение толщины, электропроводности и энергии активации примеси полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ–излучения// Дефектоскопия, 2014, N 5, c. 60–68.
- 4. *Ильинская Л.С., Подмарьков А. Н.* Полупроводниковые тензодатчики// М.Л.: Энергия, 1966.-120 с.
- 5. Скворцов А.А., Литвиненко О.В., Орлов А.М. Определение констант деформационного потенциала n–Si, p–Siпо концентрационному ангармонизму//Физика и техника полупроводников, 2003, т. 37, N1, c.17–21.
- 6. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л., Электронные свойства легированных полупроводников//М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1979. 358 с.

ТАММОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ В БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУРАХ НА ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ ЛИНИЯХ

Д.А. Усанов¹, С.А. Никитов², А.В. Скрипаль¹, Д.С. Рязанов¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского ²ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, г. Москва E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Известно, что поверхностные электронные состояния Тамма, появляются на границе полубесконечного кристалла и характеризуются дискретным энергетическим спектром и волновыми функциями, экспоненциально затухающими по мере удаления от поверхности в глубину кристалла и в пространство вне его [1–3].

При рассмотрении одномерных периодических структур, называемых одномерными фотонными кристаллами, на границе фотонного кристалла возможна локализация электрического поля при контакте фотонного кристалла с однородным слоем, характеризующимся отрицательной диэлектрической проницаемостью (проводящая среда на частотах ниже плазменной) или отрицательной магнитной проницаемостью (магнитная среда на частоте в окрестности ферромагнитного резонанса). Такая локализация электрического поля трактуется как поверхностное таммовское состояние в фотонном кристалле. При этом на АЧХ фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем, наблюдается узкий пик коэффициента прохождения электромагнитной волны, связанный с прохождением электромагнитной волны через таммовское состояние [4–6].

Состояния Тамма могут также встречаться на границе двух соединенных фотонных кристаллов при перекрытии запрещенных зон этих двух кристаллов.[4, 7]. Существование таммовского поверхностного состояния на поверхности между двумя ФК экспериментально наблюдалось в работах [6, 8].

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей возникновения таммовских состояний на границе двух брэгговских структур, выполненных в виде волноводно-щелевых линий передачи.

Общий вид исследуемой брэгговской СВЧ-структуры на основе волноводно-щелевых линий [9], составленной из двух подсистем, представлен на рис. 1. В центре поперечного сечения прямоугольного волновода (22.86 мм \times 10.16 мм) в E-плоскости размещался отрезок щелевой линии передачи.

Щелевая линия одной подсистемы брэгговской структуры выполнена на поликоровой (Al_2O_3 , $\varepsilon=9,6$) пластине длиной $L_1=15$ мм, шириной 10.16 мм и толщиной 1 мм. На одну сторону пластины было нанесено золотое покрытие толщиной 0.01 мм, ширина щели в покрытии составляла s=4.0 мм. Отрезки волноводно-щелевой линии передачи разделялись отрезками регулярного волновода длиной $d_1=10$ мм. Длина отрезков волноводно-щелевой линии второй подсистемы брэгговской структуры составляла $L_2=13$ мм, а длина отрезков ре-

гулярного волновода d_2 =15 мм. Каждая из подсистем брэгговской структуры состояла из четырех отрезков щелевой линии.

Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения брэгговской структуры исследовались с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A в диапазоне частот 8...12 ГГц.

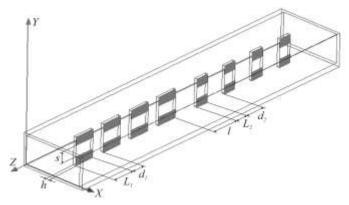


Рис. 1. Модель структуры, состоящей из двух брэгговских структур на основе волноводнощелевых линий передачи, имеющих различные размеры элементарных ячеек. $L_{1,2}$ — длины отрезков волноводно-щелевой линии передачи; $d_{1,2}$ — длины регулярных отрезков волновода; h — толщина подложки волноводно-щелевой линии, s — ширина щели, l— длина регулярного отрезка волновода. L_1 = 13 мм; d_1 = 15 мм; d_2 = 15 мм; d_2 = 10 мм; s = 4.0 мм; h = 1.0 мм; s = 9.6.

Длины отрезков волноводно-щелевой линии передачи и регулярных отрезков волновода каждой из двух брэгговских структур были выбраны таким образом, чтобы частоты, соответствующие серединам запрещенных одной и другой брэгговских структур максимально совпадали. При этом вследствие различной ширины запрещенных зон этих структур наблюдалось лишь их частичное перекрытие в частотной области.

Были измерены АЧХ фотонного кристалла, составленного из двух последовательно соединенных брэгговских структур, имеющих различные размеры элементарных ячеек. Как следует из результатов эксперимента при длине l регулярного отрезка волновода, соединяющего две брегговские структуры, равной длине регулярных отрезков одной или второй брэгговской структур, АЧХ фотонного кристалла характеризуется наличием запрещенной зоны с коэффициентом пропускания, достигающим -40 дБ (сплошные кривые на рис. 2). При этом на АЧХ фотонного кристалла в запрещенной зоне не наблюдается пик коэффициента прохождения электромагнитной волны, связанный с прохождением электромагнитной волны через таммовское состояние. При изменении длины l в запрещенной зоне фотонного кристалла возникает пик прохождения электромагнитной волны. При длине l равной 1 мм или 20 мм пик прохождения возникает в середине запрещенной зоне (штриховые кривые на рис. 2).

Таким образом, экспериментально исследовано возникновение таммовских поверхностных состояний в фотонном кристалле, составленном из двух последовательно соединенных брэгговских структур, имеющих разные размеры

элементарных ячеек и выполненных в виде волноводно-щелевых линий передачи.

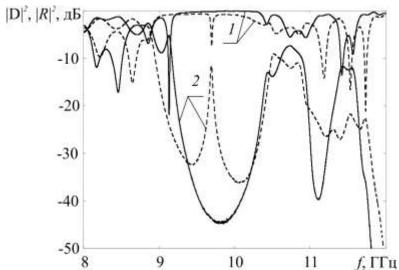


Рис. 2. Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов отражения $|R|^2$ (кривые I) и прохождения $|D|^2$ (кривые 2) фотонного кристалла, составленного из двух последовательно соединенных брэгговских структур, состоящих из 4 отрезков волноводно-щелевой линии передачи:l=1 мм (штриховые линии),l=10 мм (сплошные линии). $L_I=13$ мм;

$$d_1 = 15 \text{ mm}; L_2 = 15 \text{ mm}; d_2 = 10 \text{ mm}; s = 4.0 \text{ mm}; h = 1.0 \text{ mm}; \varepsilon = 9.6.$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Библиографический список

- 1. *Tamm, I.E.*, On the possible bound states of electrons on a crystal surface // Phys. Z. Sowiet Union. 1932. Vol. 1. P. 733.
- 2. *Tamm, I.E.* Über eine mögliche Art der Elektronenbindung an Kristalloberflächen // Zh. Eksp.Teor. Fiz. 1932. Vol. 76. No. 11–12. P. 849–850.
- 3. Tамм W.E. О возможности связанных состояний электронов на поверхности кристалла // Журн. экспер. и теор. физики. 1933. Т.3. С.34-43.
- 4. Виноградов А.П., Дорофеенко А.В., Мерзликин А.М., Лисянский А.А. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах // Успехи физических наук. 2010. Том 180. № 3. С. 249—263.
- 5. *Vinogradov, A.P., DorofeenkoA.V., ErokhinS.G., InoueM., and LisyanskyA.A.*, Microwaves in dispersive magnetic composite media, //Phys. Rev. B, Vol. 74, 045128, 2006.
- 6. Goto T., Dorofeenko A.V., Merzlikin A.M., Baryshev A.V., Vinogradov A.P., Inoue M., Lisyansky A.A., Granovsky A.B. Optical Tamm States in One-Dimensional Magnetophotonic Structures // Physical Review Letters. 2008. 101113902 (1)–113902 (3).
- 7. *Kavokin, A.V., Shelykh I.A., and Malpuech G.* Lossless interface modes at the boundary between two periodic dielectric structures // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72, p. 233102(1)–233102(4).
- 8. *Belozorov D.P., Girich A., Nedukh S.V., Moskaltsova A.N., Tarapov S.I.* Microwave Analogue of Tamm States in Periodic Chain-Like Structures // Progress in Electromagnetics Research Letters. 2014. Vol. 46. P. 7–12.
- 9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В., Рязанов Д.С. Новые области применения СВЧ фотонных кристаллов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. №3, часть 2. С. 6–19.

10. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С. Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно-щелевых линиях // Радиотехника и электроника. 2016. Том. 61. № 4. С. 321–326.

СВЧ-УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ВЫСОКОЙ КРАТНОСТИ С ВСТРОЕННЫМ СВЧ-КЛЮЧОМ НА *n-i-p-i-n-*ДИОДАХ

Д.А. Усанов¹, А.В. Скрипаль¹, В.Н. Посадский², В.С. Тяжлов², Д.В. Григорьев²

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

² АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Для обеспечения коммутации выходного сигнала умножителей частоты часто используются выключатели на p-i-n-диодах [1, 2]. Уровень ослабления в существующих выключателях на p-i-n-диодах зависит от количества диодов в схеме и варьируется в пределах 20–40 дБ, при этом использование в схемах умножения частоты СВЧ-ключей, выполненных в виде отдельных законченных узлов [3, 4], увеличивает габаритные размеры устройства и требует применения широкополосных согласующих элементов для их подключения.

В настоящей работе рассматривается возможность создания СВЧ-умножителя частоты высокой кратности с встроенным СВЧ-ключом на n–i–p–i–n-диодах.

В качестве умножителя частоты использовалась структурная схема, приведенная в работе [5] (см. рис. 1).

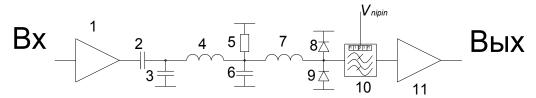


Рис. 1 Структурная схема умножителя

Входной сигнал с частотой 112.0 МГц поступает на входной усилитель, который обеспечивает достижение требуемого уровня опорного сигнала, подаваемого на умножитель, выполненный на диодах с накоплением зарядов 2A604A.

Для выделения из спектра умноженного сигнала использовался настроенный на необходимую 24-ю гармонику выходной полосно-пропускающий многозвенный фильтр (см. рис. 2), выполненный в виде последовательно расположенных встречных шпильковых резонаторов в микрополосковом исполнении [6].

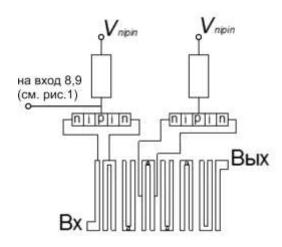


Рис. 2 Конструкция полосно-пропускающего фильтра с включенными *n-i-p-i-n-*диодами

В зависимости от расположения интегрированной в полоснопропускающий фильтр n-i-p-i-n-структуры можно добиться различной степени запирания.

Наибольший эффект выключения достигается при включении n-i-p-i-n-1 диода таким образом, чтобы одна n-область диода на входе была гальванически соединена с входным элементом микрополоскового фильтра, другая n-область n-i-p-i-n-1 диода соединена с первым шпильковым резонатором полоснопропускающего фильтра, и на p-область n-i-p-i-n-1 диода через нагрузочное сопротивление подавалось положительное напряжение V_{nipin} (см. левый n-i-p-i-n-1 диод на рис.2). При таком включении выходная мощность 24-й гармоники изменяется в диапазоне от -16.5 дБм до -70.3 дБм. Таким образом, относительное изменение мощности выходного сигнала достигает ~ 54 дБ.

При одновременном включении n-i-p-i-n-диодов в первый и центральный резонаторы полосно-пропускающего фильтра (см. рис.2) суммарное относительное изменение выходного сигнала превышает 70 дБ при изменении напряжения смещения на каждом из n-i-p-i-n-диодов в диапазоне от 0.0 В до 1.7 В.

Столь значительное изменение мощности выходного сигнала при подаче напряжения на n-i-p-i-n-диод обусловлено двумя причинами. Первая – изменение уровня сигнала, прошедшего через полосно-пропускающий фильтр, который можно рассматривать как разновидность фотонного кристалла [7, 8], вследствие поглощения или отражения электромагнитной волны от n-i-p-i-n-диодной структуры. Вторая — изменение положения рабочей точки на вольтам-перной характеристике встречно-включенных умножительных диодов при их гальваническом контакте с n-i-p-i-n-диодной структурой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ) и предприятия AO «НПЦ «Алмаз-Фазотрон».

Библиографический список

- 1. Вайсблат А.А. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах М.: Радио и Связь, 1987. 120 с.
- 2. *Тихонюк В., Бражник В.* Быстродействующие бескорпусные *p-i-n-* диоды. Новая технология изготовления// Электроника НТБ. 1997. Выпуск 1. С. 25–27.
- 3. Модуль СВЧ M 34216-1 http://www.oao-tantal.ru/tovar.php?id=3196.
- 4. Keysight Technologies 85331B/85332B. Solid State Switches. Technical Overview. (http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-4960EN.pdf?id=823356)
- 5. Усанов Д.А., Посадский В.Н., Скрипаль А.В., Тяжлов В.С., Григорьев Д.В. СВЧумножители высокой кратности// Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014, вып. 4. С. 48– 50.
- 6. Беляев Б.А., Волошин А.С., Морозов Н.В., Галеев Р.Г. Широкополосная микрополосковая антенна с полосно-пропускающим фильтром на шпильковых резонаторах// Письма в ЖТФ. 2015, том 41, вып.5. C.65-73.
- 7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю. Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов// Известия вузов. Электроника. 2008. №5. С. 25–32.
- 8. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей// Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 8. С. 143–148.

5 ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПАТЕНТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Н.В. Романова

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

В настоящее время интенсивно патентуются решения с использованием электромагнитного излучения терагерцового (ТГц) диапазона.

Настоящая работа посвящена анализу областей применения ТГц излучения в различных видах хозяйственной деятельности и повседневной жизни людей на основе обзора патентной документации.

Для анализа использовались возможности патентной базы данных (БД) Questel [1], которая содержит сведения об опубликованных патентах и патентных заявках 95 патентных ведомств.

В качестве поискового запроса выбраны ключевые слова "terahertz" или "THz". Поиск по ключевым словам осуществлялся в названиях, рефератах и формулах указанных документов. Поиски не были ограничены датой подачи или приоритета. Статистическая обработка найденных документов осуществлялась с помощью программного обеспечения указанной БД.

Комплексный анализ позволил выявить более 5237 семейств патентованалогов¹, заявки на которые были поданы в период с 1980 г., когда количество изобретений по этой тематике составляло единицы, по 2016 гг. С 1980 по 1998 гг. ежегодный прирост патентов по исследуемой теме составлял 2-3 патента в год, к 1999 году количество патентных семейств составило 21, а затем наблюдается постоянный рост заявок. В 2015 г. количество патентных семейств достигло цифры 710.

Одно из первых изобретений, в котором применена ТГц технология, относится к 1980 году. Это патент на способ уничтожения микроорганизмов во внутренней части контейнера с использованием плазмы, инициируемой сфокусированным лазерным лучом и поддерживаемой электромагнитным полем, был выдан на имя фирмы ELI LILLY (US4042325). В 1981г. на способ и устройство для неразрушающего контроля была подана заявка на изобретение, по которой был выдан патент на имя фирмы CHROMALLOY AMERICAN (US4355538).

_

 $^{^{1}}$ Патенты-аналоги — патенты, выданные в разных странах на один и тот же объект промышленной собственности.

Первый патент на аппаратуру для детектирования изображения (FR2687846) относится к 1983 г. Данная аппаратура была запатентована сразу в ряде стран (Германия, Швеция, Великобритания, Канада).

Массачусетский технологический институт разработал и запатентовал в 1984 г. туннельные передающие устройства (US4745452).

Одно из последних изобретений, опубликованных в 2017 г., относится к системе ремонта дорожного покрытия (CA2906019). Патенты -аналоги на данное изобретение имеются в США, Австралии, ряде стран Европы, Индии, Мексике.

Ведущими странами по количеству поданных заявок являются Китай 2302, Япония 1229, США 888, Корея 256, Германия 227, Великобритания 129, Россия 67, Франция 53.

По количеству изобретений наиболее часто встречающиеся заявители распределились следующим образом:

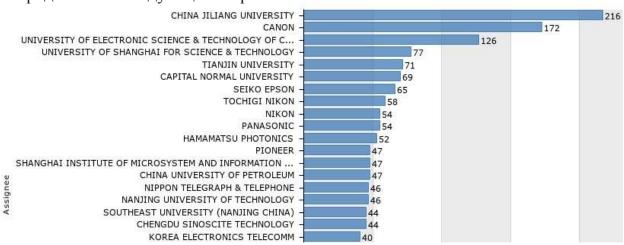


Рис. 1

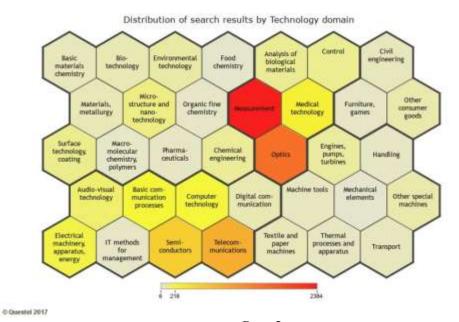


Рис. 2

Из приведенных на рис. 2 результатов видно, что наибольшее количество патентов относится к областям измерительной техники 2384, оптики 1552 и телекоммуникации 928.

Одной из ведущих фирм в данных областях является фирма Teraview. Разработанные терагерцовые приборы, уже выпущенные на рынок, предназначены для генерирования, детектирования и исследования характеристик широкого спектра материалов. Фирма также является первой в применении терагерца в биомедицинской визуализации.

Важное место занимают системы безопасности. ТГц излучение используется для сканирования багажа и людей. Оно не наносит такого вреда организму, как рентгеновское.

На втором месте по количеству патентных семейств идут **полупроводниковые** и **медицинские технологии** - 608 и 282 соответственно. Первые патенты в области медицины с применением ТГц относятся 1999 г.:

Радиационный зонд для обнаружения кариеса (WO200050859; TERAPROBE; TERAVIEW; TOSHIBA);

Способ и устройство для получения терагерцового изображения (WO200106915; TERAPROBE; TERAVIEW; TOSHIBA).

Над проблемами применения терагерцовых технологий в медицине работают и такие фирмы как Canon (одиннадцать семейств патентов-аналогов), University of Seoul; Shenzhen Institute of advanced technology GAS (по 8 семейств патентов-аналогов), Siemens (пять семейств патентов-аналогов). Изобретения касаются новых методов диагностики и лечения заболеваний, в том числе онкологических (например, EP2550521, заболеваний сердца (RU2536058), стрессовых состояний (RU2284327) и др. [2,3]

Патенты по остальным областям распределились следующим образом:

коммуникационные процессы — 259; компьютерные технологии, включая IT методы управления — 212; электрические машины, аппараты, энергия — 196; ауди-визуальные технологии -142; микроструктурные и нано-технологии — 110; технологии нанесения покрытий — 94; технологии контроля — 93; анализ биологических материалов — 89; химическая инженерия, микромолекулярная химия, полимеры — 79; двигатели, насосы, турбины — 71; экологические технологии — 63; биотехнологии — 43; металлургия, материалы — 40; текстильные и бумажные машины — 34; базовые химические материалы -33; транспорт — 27; станки — 27; тепловые процессы и аппараты — 22; фармацевтика — 19; обработка материалов —18; мебель, игры — 16; другие специфические области — 53.

Среди последней группы можно назвать способ и устройство для автоматической идентификации изделий в торговых точках (EP 2199779), аппаратуру для оценки всхожести семян (CA2920428).

Приведенные сведения показывают, что терагерцовые технологии имеют чрезвычайно широкие перспективы применения в различных отраслях. Спектр областей использования ТНz постоянно расширяется [4]. Ответ на вопрос,

какие новшества ожидают нас в ближайшее время, может дать мониторинг изобретений, сведения о которых появляются в патентных базах данных раньше чем в статьях и на рынке.

Библиографический список

- 1. БД Questel www.orbit.com;
- 2. *Киричук В.Ф., Иванов А.Н., Цымбал А.А.* и др.: «Применение терагерцовой терапии в клинической практике (методические рекомендации) // Саратов, 2011.
- 3. *Чекрыгина И.М., Чекрыгин А.Э., Чекрыгин В.Э.*: «Терагерцовые технологии медицине», // 20th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", 13-17 September, Sevastopol, 2010.
- 4. Yun-Shik Lee: «Principles of Terahertz Science and Technology», // Springer, 2009.

ТЕРАГЕРЦОВОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ФОТОТОКОВ В ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ

В.В. Попов^{1,2}

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

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: glorvv@gmail.com

Возбуждение плазмонов может усиливать фотовольтаические эффекты вследствие локализации и концентрации света в активной области структуры [1]. В отличие от поверхностных плазмон-поляритонов в металлах, возбуждаемых в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, плазмоны в двумерных электронных системах (2МЭС) возбуждаются на терагерцовых частотах [2]. В данном докладе обсуждаются поляризационно-зависимые фототоки, возбуждаемые плазменной волной в однородной центросимметричной 2МЭС. Показано, что линейный фототок может быть интерпретирован как эффект плазмонного увлечения, зависящий от поляризации плазменной волны. Поперечная компонента тока плазмонного увлечения появляется, если электрическое поле линейно-поляризованного плазмона образует угол с волновым вектором плазмона в плоскости 2МЭС. Циркулярно-зависимая компонента фототока направлена поперек волнового вектора плазмона и меняет направление на противоположное при изменении знака циркулярной поляризации плазменной волны.

Плазменные колебания в 2MЭC описываются гидродинамическими уравнениями

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V} + \frac{\mathbf{V}}{\tau} + \frac{e}{m}\mathbf{E} = 0,$$
(1)

$$e\frac{\partial N}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \tag{2}$$

где $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ — электрическое поле плазменной волны, зависящее от времени t и радиуса-вектора $\mathbf{r}(x,y)$ в плоскости 2МЭС, τ — время рассеяния электронов в 2МЭС, $\mathbf{j}(\mathbf{r},t) = -eN(\mathbf{r},t)\mathbf{V}(\mathbf{r},t)$ — плотность индуцированного электрического тока, $\mathbf{V}(\mathbf{r},t)$ и $N(\mathbf{r},t)$ — соответственно гидродинамическая скорость и плотность электронов в 2МЭС, e и m — соответственно заряд (e> 0) и эффективная масса электрона.

Предположим, что плазменная волна распространяется в x-направлении и имеет произвольную поляризацию в плоскости $2M \ \$ с компонентами электрического поля

$$\begin{split} E_x(x,t) &= (E_{\omega,q,x} / 2) \exp(-i\omega t + iqx) + \text{k.c.}, \\ E_y(x,t) &= (E_{\omega,q,y} / 2) \exp(-i\omega t + iqx - i\delta) + \text{k.c.}, \end{split}$$

где $E_{\omega,q,x}$ и $E_{\omega,q,y}$ — действительные амплитуды x- и y-компонент электрического поля. Волна имеет линейную и циркулярную поляризацию в плоскости 2МЭС соответственно при $\delta=0,\pi$ и $\delta=\pm\pi/2$.

Применение теории возмущений для решения уравнений (1) и (2) позволяет вычислить компоненты выпрямленного тока \mathbf{j}_0 :

$$j_{0x}^{(\text{lin})} = -\frac{qe^3N^{(0)}\tau^2}{2\omega m^2(1+\omega^2\tau^2)}E_{\omega,q,x}^2,\tag{4}$$

$$j_{0y} = j_{0y}^{(\text{lin})} + j_{0y}^{(\text{circ})}$$
, где

$$j_{0y}^{(\text{lin})} = -\frac{qe^3N^{(0)}\tau^2}{2\omega m^2(1+\omega^2\tau^2)}E_{\omega,q,x}E_{\omega,q,y}\cos\delta,$$
 (5)

$$j_{0y}^{\text{(circ)}} = -\frac{qe^3N^{(0)}\tau^3}{2m^2(1+\omega^2\tau^2)}E_{\omega,q,x}E_{\omega,q,y}\sin\delta,\tag{6}$$

и $N^{(0)}$ – равновесная электронная плотность в 2МЭС.

Физика фототока $j_{0x}^{(\mathrm{lin})}$ обсуждалась в [3]. Этот фототок направлен вдоль волнового вектора плазмона и, следовательно, может быть интерпретирован как ток продольного плазмонного увлечения электронов. Для того чтобы выяснить физику фототоков $j_{0y}^{(\mathrm{lin})}$ and $j_{0y}^{(\mathrm{circ})}$, рассмотрим два частных случая поляризации плазмонного поля. Сначала предположим, что электрическое поле плазмона имеет линейную поляризацию ($\delta=0$) и направлено под произвольным углом к волновому вектору плазмона в плоскости 2МЭС. Тогда из уравнений (4), (5) и (6) следует, что фототок $j_{0y}^{(\mathrm{circ})}$ равен нулю и $j_{0y}^{(\mathrm{lin})}$ / $j_{0x}^{(\mathrm{lin})}$ = $E_{\omega,q,y}$ / $E_{\omega,q,x}$. Это означает, что фототок течет в направлении линейно поляризованного электрического поля. Поэтому этот фототок мы называем линейным фототоком. Линейный фототок исчезает ($j_{0x}^{(\mathrm{lin})}$ = $j_{0y}^{(\mathrm{lin})}$ = 0), если электрическое поле направлено поперек волнового вектора плазмона в плоскости 2МЭС.

Далее предположим, что электрическое поле плазмона циркулярно поляризовано ($E_{\omega,q,x}=E_{\omega,q,y},\ \delta=\pm\pi/2$). В этом случае поперечный линейный фототок $j_{0y}^{(\text{lin})}$ равен нулю, а фототок $j_{0y}^{(\text{circ})}$ меняет направление на противоположное при изменении знака циркулярной поляризации. Поэтому мы называем поперечный фототок $j_{0y}^{(\text{circ})}$ циркулярным плазмонным фототоком [4].

Внутренние относительные чувствительности (на единицу площади 2МЭС) $R_x^{(\text{lin})}$, $R_y^{(\text{lin})}$, и $R_y^{(\text{circ})}$ для различных компонент фототока $j_{0x}^{(\text{lin})}$, $j_{0y}^{(\text{lin})}$, и $j_{0y}^{(\text{circ})}$ определяется как отношение величины плотности соответствующего фототока к поглощаемой мощности на единице площади 2МЭС. Как следует из выражений (4)-(6), отношение между циркулярной и линейной компонентами фототока пропорционально $\omega \tau$. Поэтому циркулярная компонента плазмонного фототока может значительно превосходить линейную компоненту фототока в 2МЭС с высокой подвижностью электронов (рис. 1).

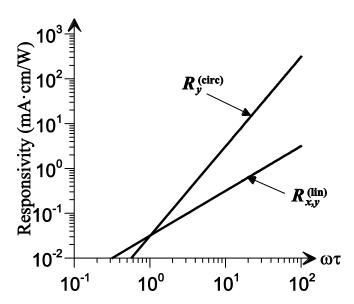


Рис. 1. Зависимости внутренних чувствительностей от времени электронного рассеяния для 2МЭС в гетероструктуре InAlAs/InGaAs/InP на частоте $\omega/2\pi=1$ ТГц при $q=2\pi\times10^4$ см $^{-1}$.

Чувствительности $R_{x,y}^{({
m lin})}$ и $R_y^{({
m circ})}$ вычислены соответственно при $\delta=0$ и $\delta=\pi/2$ и $E_{\omega,q,x}=E_{\omega,q,y}.$

Библиографический список

- 1. *Atwater H., Polman A.* Plasmonics for improved photovoltaic devices //Nature Materials. 2010. V.9, P. 205-213.
- 2. *Popov V.V.* Plasmon excitation and plasmonic detection of terahertz radiation in the grating-gate field-effect-transistor structures //J. Infrared Millimeter THz Waves. 2011. V.32. P. 1178-1191.
- 3. *Popov V.V.* Terahertz rectification by periodic two-dimensional electron plasma //Appl. Phys. Lett. 2013. V.102, P. 253504 (1-5).
- 4. *Popov V.V.*Polarization-dependent plasmonic photocurrents in two-dimensional electron systems //Appl. Phys. Lett. 2016. V.108, P. 261104 (1-5).

НОВЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

О.Е. Глухова, В.В. Шунаев, М.М. Слепченков, А.С. Хино Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: vshunaev@list.ru

В настоящее время детектирование терагерцовых волн с помощью углеродных наноматериалов осуществляется главным образом посредством плазмонного резонанса [1] и болометрического метода [2]. Однако каждый из указанных способов не лишен недостатков. К недостаткам метода поверхностного плазмонного резонанса относится узкий рабочий частотный диапазон. Технология болометрического метода подразумевает наличие дополнительного детектирующего элемента, передающего сигнал нанотрубке, а значит, не исключено искажение или частичная потеря передаваемой информации. Других способов детектирования терагерцового излучения на данном этапе развития терагерцовой электроники не предложено.

В данной работе предложена новая теоретическая модель терагерцового нанодетектора на базе функционализированной углеродной нанотрубки. В рамках этой модели предлагается регистрировать падающую электромагнитную волну по резкому изменению электропроводности углеродного материала. Реализовать резкий скачок электропроводности нанотрубки можно следующим образом. Из экспериментальных данных [3] известно, что внутри замкнутого пространства нанотрубки могут быть заперты свободные фуллерены. Это замкнутое пространство образовано другими фуллеренами, спекшимися с нанотрубкой и формирующими вместе со своим окружением потенциальную яму. Находясь внутри потенциальной ямы, свободный фуллерен может совершать вдоль и поперек оси трубки перемещения, имеющие характер колебаний. Если фуллерен предварительно зарядить, в частности, путем инкапсуляции в его полость иона щелочного металла, то в процессе своих перемещений в яме объект может обмениваться зарядом, как со стенками трубки, так и с цепочкой закрепленных фуллеренов. Согласно нашей гипотезе при сближении комплекса $A^+ @ C_{60}$ со стенкой нанотрубки будет наблюдаться перетекание заряда с трубки на фуллерен. Прогнозируется, что под действием внешней электромагнитной волны терагерцового диапазона, падающей на углеродную структуру, с трубки будет уходить сравнительно больший заряд. Следовательно, величину изменяющейся при этом проводимости трубки будет легко измерить с помощью внешнего устройства. Конструкция предлагаемого нами нанодетектора схематично изображена на рис. 1.

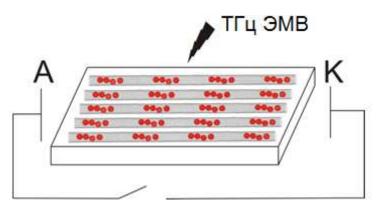


Рис. 1. Схематичное изображение терагерцового нанодетектора на базе функционализированной углеродной нанотрубки.

Результаты численного моделирования методом AIREBO [4] в программном комплексе KVAZAR [5] показали, что комплекс $A^+ @ C_{60}$, находясь внутри нанотрубки в потенциальной яме, может совершать колебания поперек оси трубки. Анализ динамики комплекса А+@С60 внутри нанотрубки позволил установить, что минимально допустимое расстояние ($\sim 1.7 \text{ Å}$), на которое C_{60} сближается со стенками нанотрубки, достигается при действии внешнего электромагнитного поля мощностью 212 мкВт. Это расстояние, как мы полагаем, является достаточным для индуцирования ощутимого перетекания заряда с трубки на $A^+ @ C_{60}$, а значит, и для создания резкого скачка удельной электропроводности структуры. Для того чтобы проверить справедливость этого предположения, были рассчитаны зависимости удельной электропроводности исследуемой структуры от приложенного напряжения для трех различных расстояний между $A^+ @ C_{60}$ и стенками трубки. Соответствующий график представлен на рис. 2. Из представленного рисунка видно, что с уменьшением расстояния между нанотрубкой и $A^+ @ C_{60}$ удельная электропроводимость гибридной структуры становится более чувствительной к приложенному напряжению. Наиболее заметный всплеск проводимости наблюдается при величине подаваемого напряжения 4 В в момент приближения $A^+ @ C_{60}$ к стенкам трубки на расстояние 1.7 Å. В указанном случае изменение электропроводности достигает 9%. При этом заряд на трубке в среднем меняется в диапазоне (-0,037; -0,55) е, а между трубкой и С60 протекает ток порядка 1,9-3,5 нА.

В итоге, мы разработали новый физический принцип детектирования электромагнитных волн терагерцового диапазона, в основе которого положен эффект изменения электропроводности функционализированной фуллеренами нанотрубки при облучении её ТГц-излучением. Полученные в работе результаты показывают, что добиться изменения электропроводности нанотрубной углеродной структуры можно, поместив внутрь трубки заряженный комплекс $A^+ @ C_{60}$, на которой и будет перетекать заряд структуры в процессе его сближения со стенками нанотрубки. Для увеличения интенсивности скачка электропроводности необходимо приложить к структуре внешнее поле большей мощности.

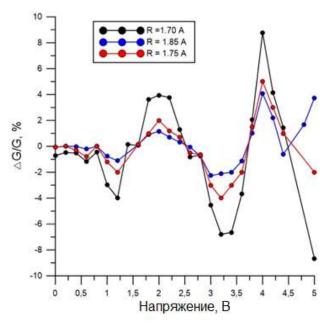


Рис. 2. График изменения проводимости функционализированной нанотрубки от напряжения при различных расстояниях между трубкой и фуллереном

Библиографический список

- 1. Degl'InnocentiR.,Xiao L., Kindness S.J. et al. Bolometric detection of terahertz quantum cascade laser radiation with graphene-plasmonic antenna arrays// Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, V.50 (17). P. 174001-174006
- 2. Zhang Q., Hároz E.H., Jin Z. et al. Plasmonic Nature of the Terahertz Conductivity Peak in Single-Wall Carbon Nanotubes // Nano Letters.,2013,V.13(12), P. 5991–5996
- 3. Slepchenkov M.M., Nasibullin A.G., Glukhova O.E.et al. Giga- and terahertz-range nanoemitter based on peapod structure // Nano Research. 2015. V. 8 (8). P. 2595-2602.
- 4. Stuart S.J., Tutein A.B., Harrison J.A. A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions // Journal of Chemical Physics, V. 112. 2000. P. 6472
- 5. http://nanokvazar.ru/

УСИЛЕНИЕ ТГц ПЛАЗМОНОВ В АКТИВНОМ ГРАФЕНЕ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ НАКАЧКЕ ОПТИЧЕСКИМИ ПЛАЗМОНАМИ

И.М. Моисеенко¹, М.Ю. Морозов², В.В. Попов^{1,2}

 ¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
 ² Саратовкий филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН E-mail: MoiseenkoIM@yandex.ru

Нулевая ширина запрещенной зоны в графене позволяет достичь отрицательной ТГц проводимости [1], а значит и усиления в ТГц диапазоне частот. Усиление ТГц плазмонов при прямой накачке графена оптическим излучением рассматривалось в [2,3], однако такой метод накачки недостаточно эффективен, поскольку поглощение оптического излучения в графене составляет менее 2,3% [4]. Метод диффузионной накачки графена, реализуемый с помощью внешней оптической накачки полупроводника (далее этот метод будем называть диффу-

зионной накачкой оптическим излучением) и позволяющий 30 раз снизить мощность исходной оптической накачки, по сравнению с прямой накачкой графена, описан в работе [5].

В данной работе исследовано усиление ТГц плазмонов в графене с диф-

фузионной накачкой оптическими плазмонами, распространяющимися вдоль поверхности металла, отделенного от графена слоем полупроводника и тонким слоем изолятора (рис. 1). Создание инверсной населенности носителей заряда в графене происходит путем амбиполярной диффузии в направлении к графенувозбужденных оптическими плазмонами в полупроводниковом слое электрон дырочных пар, которые захваты-

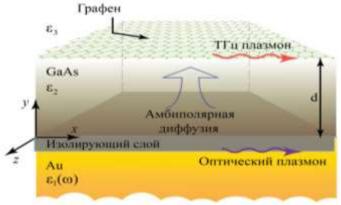


Рис. 1 Схематическое изображение структуры

ваются в графен. Тонкая изолирующая прослойка предотвращает выброс носителей заряда из полупроводника в металл.

Дисперсионное соотношение для плазмонов в исследуемой структуре при пространственно-временной зависимости поля плазмона $\sim \exp(-i\omega t + ik_x x + ik_y y)$ имеет следующий вид:

$$\frac{\varepsilon_3}{k_{y3}} \Big[A \exp(2ik_{y2}d) + 1 \Big] + \frac{\varepsilon_2}{k_{y2}} \Big[A \exp(2ik_{y2}d) - 1 \Big] = \frac{\sigma_{gr}}{\varepsilon_0 \omega} \Big[A \exp(2ik_{y2}d) + 1 \Big], \qquad (1)$$
 гд е $k_{yj} = \pm \sqrt{\varepsilon_j \, \omega^2/c^2 - k_x^2}$ и k_x — соответственно нормальная и тангенциальная компоненты волнового вектора плазмона относительно поверхности металла, $j = 1, 2, 3$ — номер среды $(1 - \text{металл}, 2 - \text{полупроводник}, 3 - \text{окружающая среда},$ в расчетах предполагался воздух), ω — круговая частота плазмона, ε_j — относительная диэлектрическая проницаемость j -го слоя, ε_0 — электрическая постоянная, d — толщина полупроводникового слоя, $A = \left(\varepsilon_{\parallel}(\omega)/k_{y1} - \varepsilon_2/k_{y2}\right) \Big/ \left(-\varepsilon_{\parallel}(\omega)/k_{y1} - \varepsilon_2/k_{y2}\right)$. Диэлектрическая проницаемость металла принимается в виде $\varepsilon_1(\omega) = 1 - \omega_{pl}^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma)$, где γ — частота столкновений электронов в металле, $\omega_{pl} = \sqrt{n_0 e^2 / \varepsilon_0 m}$ — плазменная частота, ω_0 — электронная плотность в металле, $\omega_{pl} = \sqrt{n_0 e^2 / \varepsilon_0 m}$ — плазменная частота, ω_0 — электронная плотность в металле, $\omega_{pl} = \sqrt{n_0 e^2 / \varepsilon_0 m}$ — плазменная частота, ω_0 — электронная плотность в металле, ω_0 — зактронная плотность в металле, ω_0 — выбирается из условия экспоненциального спада поля от поверхности металла.

Максимальная концентрация носителей заряда в графене при диффузионной накачке оптическим излучением (кривая 1 на рис. 2) достигается при толщине полупроводникового слоя $d\approx 2$ мкм, сравнимой с длиной диффузии в по-

лупроводнике. При диффузионной накачке графена оптическими плазмонами генерация носителей заряда происходит в тонком слое полупроводника за счет сильной локализации оптического плазмона. Максимальное значение концентрации носителей заряда в графене достигается при толщине полупроводникового слоя *d*≈180 нм (кривая 2 на рис. 2), что на два порядка величины меньше длины диффузии в полупроводнике и, следовательно, практически все генерируемые оптическим плазмоном носители заряда достигают графена (доля рекомбинирующихэлектрон-дырочных пар мала). Вследствие этого, диффузионная накачка графена оптическими плазмонами позволяет достичь большей инверсии концентрации носителей заряда в графене при той же мощности накачки по сравнению с диффузионной накачкой графена оптическими излучением. Следовательно, диффузионная накачки, необходимую для достижения максимального значения коэффициента усиления ТГц плазмона в графене, по сравнению с диффузионной накачкой оптическим излучением.

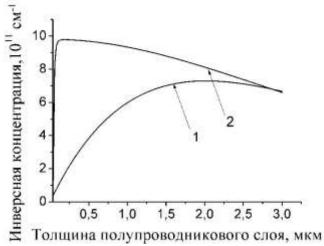


Рис. 2. Зависимость концентрации носителей заряда в графене от толщины полупроводникового слоя при диффузионной накачке оптическим излучением (кривая 1) и при диффузионной накачке графена оптическими плазмонами (кривая 2) при мощности оптического излучения и оптического плазмона $P=5,1\cdot10^4\,\mathrm{BT/cm}^2$

На рис. 3 представлен коэффициент усиления плазмонов в графене на частоте 7 ТГц в зависимости от мощности накачки для рассматриваемых типов накачки графена. Поведение кривых 1 и 2 на рис. 3 обусловлено конкуренцией процессов друдевского поглощения и усиления за счет межзонных переходов в графене [5]. Видно, что диффузионная накачка графена оптическими плазмонами (кривая 1) позволяет использовать на 25% меньшую мощность накачки, по сравнению с диффузионной накачкой графена оптическим излучением (кривая 2) для достижения максимального коэффициента усиления ТГц плазмонов в графене.

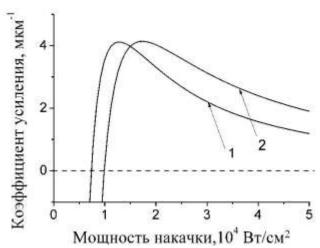


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления ТГц плазмона в графене от мощности накачки при диффузионной накачке оптическим излучением(кривая 1) и при диффузионной накачке графена оптическими плазмонами (кривая 2)

Работа поддержана РФФИ (проект №16-32-00524мол а).

Библиографический список

- 1. *RyzhiiV.*, *RyzhiiM.*, *OtsujiT.* Negative dynamic conductivity of graphene with optical pumping // Journal of Applied Physics. 2007. V. 101. P. 083114.
- 2. *AleshkinV.Ya., DubinovA.A. et al.* Terahertz Laser Based on Optically Pumped Graphene: Model and Feasibility of Realization//JETP Letters.2009. Vol. 89. P. 70.
- 3. *DubinovA.A.*, *AleshkinetalV.Ya*. Terahertz surface plasmons in optically pumped graphene structures //J. Phys.: Condens. Matter. 2011. V. 23.P. 145302.
- 4. *NairR.R.*, *BlakeP.*, *GrigorenkoA.N.*, *NovoselovK.S.*, et al. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene// Science. 2008. V.320, P. 1308.
- 5. *MorozovM.Yu., DavoyanA.R. et al.* Active guiding of Dirac plasmons in grapheme//Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 061105.

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПЛАЗМОННЫЙ ДЕТЕКТОР ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

К.В. Машинский ^{1,2}, Д.В. Фатеев², В.В. Попов^{1,2,3}
¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
²Саратовский филиал Института радиотехники и электроникиим. В.А. Котельникова РАН
³Саратовский научный центр РАН
E-mail: konstantin-m92@yandex.ru

Детектирование терагерцового (ТГц) излучения в графеновых микро- и наноструктурах вызывает большой научный интерес за счет уникальных электронных свойств графена [1,2]. Нелинейные свойства плазменных волн в графене[3] порождают два различных механизма плазмонного детектирования

ТГц волн, связанные с эффектом плазмонного увлечения электронно-дырочного плазмонного храповика [4].

В данной работе рассматривается слой графена, экранированный двойным металлическим решеточным затвором (рис. 1(а)). Графен расположен на подложке, состоящей из SiO₂ и отделен от двойного решеточного затвора барьерным подрешетки слоем, состоящим ИЗ Al_2O_3 . Две пространственно смещены друг относительно друга для создания асимметрии периодической элементарной ячейки периодической структуры. Приложение постоянного напряжения между затворной решеткой и графеном позволяет контролировать равновесную концентрацию носителей заряда в подзатворных областях графена. Тип носителей заряда в подзатворных областях зависит от знака напряжения.

Нелинейная динамика носителей заряда в графене описывается в гидродинамическом приближении [5]. Уравнения гидродинамики решаются методом теории возмущений [6] путем разложения скорости носителей заряда, энергии Ферми и плотности тока по степеням амплитуды действующего электрического поля с сохранением только линейных и квадратичных членов разложения. Применяются приближения нулевой температуры и малой скорости движения носителей заряда. Электрическое поле плазмонов в графене, индуцированное нормально падающей на структуру ТГц волной, вычислено с использованием самосогласованного электродинамического подхода [7].

Для гармонического электрического поля $E(x,t) = E_{\omega}(x) \exp(-i\omega t)/2 + \text{с.c.}$, где ω — частота падающей волны, плотность полного выпрямленного тока имеет вид [4]:

$$j_{0} = \frac{|e|^{3} v_{F}^{2}}{\hbar^{2} \pi \omega \gamma (\omega^{2} + \gamma^{2})} \left\langle \operatorname{sgn}(e) \operatorname{Re}\left((2\omega + i\gamma) E_{\omega} \frac{\partial (E_{\omega})^{*}}{\partial x}\right)\right\rangle, \quad (1)$$

где |e| - элементарный заряд (e < 0 для электронов, e > 0 для дырок), γ - период релаксации импульса носителей заряда, $\nu_{\rm F}$ - скорость Ферми носителей заряда, а квадратные скобки обозначают усреднение по пространству.

Токовая чувствительность детектирования ТГц излучения рассчитывается по формуле $R=j_0$ / Pl, гдеP=1 Вт/см 2 — мощность ТГц волны, нормально падающей на площадь графеновой структуры, равную 1×1 мм.

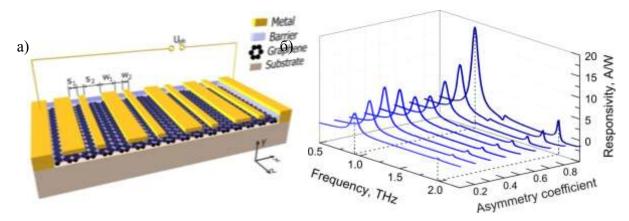


Рис. 1. (а) Схематическое изображение графеновой структуры с двойным решеточным затвором; (б) Токовая чувствительность R в зависимости от частоты падающей волны и коэффициента асимметрии структуры $1-s_1/s_2$. Расчетные параметры:

$$w_2 = 0.25 \text{ MKM}, s_1 + s_2 = 0.375 \text{ MKM}, \ \gamma = 5 \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$$

На рис. 1(б) показана токовая чувствительность ТГц детектирования, вычисленная в графеновой структуре с двойным решеточным затвором и распределением энергии Ферми носителей $\varepsilon_{F,w_1} = \varepsilon_{F,s_2} = \varepsilon_{F,s_3} = -\varepsilon_{F,w_3} = 39$ мэВ. Резонансные пики на рис. 1(б) связаны с возбуждением плазмонных мод под широкими затворами. В этом случае, детектирование ТГц излучения связано с эффектом плазмонного электроннодырочного храповика [4], а величина токовой чувствительности может достигать значения 20 А/Вт для больших значений коэффициента асимметрии более. $1-s_1/s_2$ что чем на порядок, превышает значения чувствительности плазмонного детектирования в полевых транзисторах на основе GaAs/AlGaAs [8].

Таким образом, в этой работе была изучена зависимость токовой чувствительности плазмонного детектирования в графеновой структуре с периодическим решеточным затвором от асимметрии элементарной ячейки. Высокая токовая чувствительность структуры позволяет использовать ее в качестве эффективного детектора ТГц излучения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 15-02-02989, 16-02-00814 и 17-52-53063) и гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-5447.2016.2).

Библиографический список

- 1. GeimA.K., NovoselovK.S. The rise of graphene.// NatureMater.2007. V.6. P.183–191.
- 2. Olbrich P., Kamann J., König M., Munzert J., Tutsch L., Ming-Hao Liu, Eroms J., Weiss D., Golub L.E., Ivchenko E.L., Popov V.V., Fateev D.V., Mashinsky K.V., Fromm F., Seyller Th., Ganichev S.D. Terahertz ratchet effect in graphene with a lateral superlattice // Phys. Rev. B. 2016. V. 93. P. 075422-075437.
- 3. *Tomadin A., Tredicucci A., Pellegrini V., Vitiello M.S., Polini M.* Photocurrent-based detection of terahertz radiation in graphene // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 211120-211123.
- 4. *Fateev D.V., Mashinsky K.V., Popov V.V.* Terahertz plasmonic rectification in a spatially periodic graphene // Appl. Phys. Lett. 2017. V.110. P. 061106-061109.

- 5. *Rudin S.* Non-linear plasma oscillations in semiconductor and Graphene channels and application to the detection of terahertz signals // Int. J. High Speed Electron. and Systems. 2011. V. 20(3). P. 567-583.
- 6. Aizin G.R., Fateev D.V., Tsymbalov G.M., Popov V.V. Terahertz plasmonphotoresponse in a density modulated two-dimensional electron channel of a GaAs/AlGaAs field-effect transistor // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 163507-163509.
- 7. Φ атеев Д.В., Попов. В.В., Шур М.С. Трансформация плазмонного спектра в транзисторной структуре с решеточным затвором и пространственно-модулированным двумерным электронным каналом // Φ ТП. 2010. Т. 44(11). С. 1455-1462.
- 8. Popov V.V., Ermolaev D.M., Maremyanin K.V. Maleev N.A., Zemlyakov V.E., Gavrilenko V.I., ShapovalS.Yu. High-responsivity terahertz detection by on-chip InGaAs/GaAs field-effect-transistor array // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 153504-153506.

Научное издание

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

Материалы четвертой Всероссийской научной школы-семинара

Под редакцией профессора Д. А. Усанова

Подписано в печать 05.05.17 Формат 60×84 1/16. Усл.печ.л. 6,0 (6,25). Тираж 80 экз. Заказ 38.

Издательство Саратовский источник. 410012, Саратов, Кутякова, 138Б. Типография Саратовский источник. 410012, Саратов, Кутякова, 138Б.