



**28-я Международная Крымская конференция
СВЧ-техника
и телекоммуникационные
технологии
Материалы конференции**

**9—15 сентября 2018 г.
Севастополь, Крым, Россия**

Том 4

Секция 5а: Материалы и технология СВЧ-приборов
Секция 5b/1: Нанoeлектроника и нанотехнология
Секция 5b/2: Нанотехнология и наноматериалы
Секция 5b/3: Наносенсоры, нанодетекторы, нанофотоника

Москва • Минск • Севастополь
2018

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431
С255

Организаторы:

Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) — проект № 18-07-20051

Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи

(РНТОРЭС) им. А. С. Попова

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (Москва)

Крымский научно-технологический центр им. проф. А. С. Попова (Севастополь)

Севастопольский государственный университет,

Институт радиоэлектроники и информационной безопасности

Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского,

Физико-технический институт (Симферополь)

Крымская астрофизическая обсерватория,

Отдел радиоастрономии и геодинамики (Кацивели)

Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина (Екатеринбург)

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск)

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ОАО «НПП „Исток“ им. Шокина» (Фрязино)

АО «Микроволновые системы» (Москва)

АО «Научно-производственное предприятие „ФАЗА“» (Ростов-на-Дону)

НПП «Системные ресурсы» (Москва)

ООО «Радиокомп» (Москва)

Техническая и информационная поддержка:

IEEE, Moscow MTT/ED Chapter

IEEE, Moscow AP Chapter

Медиагруппа «Электроника»

С255 28-я Международная Крымская конференция «**СВЧ-техника** и телеком-
муникационные технологии» (КрыМиКо'2018). Севастополь, 9—15 сентября
2018 г. : материалы конференции. — Москва ; Минск ; Севастополь, 2018.

Т. 4 : vii, 265 [826—1090] с. : ил.

В 4-й том включены материалы 41 доклада, которые были представлены на заседаниях секций 5а: Материалы и технология СВЧ-приборов; 5b/1: Нанозлектроника и нанотехнология; 5b/2: Нанотехнология и наноматериалы; 5b/3: Наносенсоры, нанодетекторы, нанофотоника.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий. Сборник также будет полезен студентам и аспирантам телекоммуникационных, радиотехнических и радиофизических факультетов вузов.

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431

© Оргкомитет КрыМиКо'2018
© КНТЦ им. Попова, 2018

Том 4

СЕКЦИЯ 5а: МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ СВЧ-ПРИБОРОВ

5a.1	ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНЫХ СВЧ-ФОТОДИОДОВ С БАРЬЕРОМ ШОТКИ НА ОСНОВЕ InAlAs/InGaAs/InP ГЕТЕРОСТРУКТУР Журавлев К. С., Аксенов М. С., Валишева Н. А., Дмитриев Д. В., Торопов А. И., Гилинский А. М., Чистохин И. Б., Малышев С. А., Чиж А. Л., Микитчук К. Б.	826
5a.2	СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ ММ и СубММ ВОЛН Паршин В. В., Серов Е. А., Николенко А. С., Хатилов С. А.	831
5a.3	ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТРОНЦИЙЗАМЕЩЁННОГО БАРИЕВОВОГО ГЕКСАГОНАЛЬНОГО ФЕРРИТА ДЛЯ СВЧ ТЕХНИКИ Коровушкин В. В., Степович М. А., Шипко М. Н., Труханов А. В.	838
5a.4	ИНТЕРФЕЙСНЫЕ СОСТОЯНИЯ В СВЧ ФОТОННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ ЛИНИЙ Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Рязанов Д. С.	843
5a.5	ВЛИЯНИЕ АНТИПИРЕНОВЫХ ПРОПИТОК НА СВОЙСТВА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТИЧНОГО ПЕНОПОЛИУРЕТАНА Семкин А. О., Visakh P. M., Резаев И. А., Фатеев А. В.	849
5a.6	МЕТАМАТЕРИАЛЫ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ СИНИС БОЛОМЕТРАМИ Юсупов Р. А., Соболев А. С., Гунбина А. А., Мансфельд М. А., Чекушкин А. М., Вдовин В. Ф., Тарасов М. А., Эдельман В. С.	856
5a.7p	ЯНУС-ПОДОБНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ КАК АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ СИСТЕМ Торхов Н. А., Номоев А. В., Новиков В. А., Юмжапова Н. В.	862
5a.8p	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ПЕРИФЕРИИ ПЛОСКИХ КРЕМНИЕВЫХ p-n ПЕРЕХОДОВ Торхов Н. А., Новиков В. А.	869
5a.9p	СПОСОБ СОЗДАНИЯ ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩИХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ РАЗРЕЗНЫХ КОЛЕЦ В ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧ СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ Малышев И. В., Николаев Е. В.	876
5a.10p	МДМ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК Афанасьев М. С., Белорусов Д. А., Киселев Д. А., Левашов С. А., Чучева Г. В.	*
5a.11p	ВОЛНОВодные СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С ПЛОСКИМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Мерданов М. К., Евтеев С. Г., Пономарев Д. В.	884
5a.12p	ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЩЕЛЕВЫХ СОЛИТОНОВ В СТРУКТУРЕ СВЯЗАННЫХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ Матвеев О. В., Морозова М. А.	891
5a.13p	НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СВЯЗАННОЙ СТРУКТУРЕ «МАГНОННЫЙ КРИСТАЛЛ — ФЕРРОМАГНИТНАЯ ПЛЕНКА» Матвеев О. В., Морозова М. А.	896

5a.14p	О ВОЛНОВЕДУЩИХ СВОЙСТВАХ ГРАДИЕНТНЫХ КИРАЛЬНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ С УЧЁТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИИ Руденок И. П., Киреева А. И.	*
5a.15p	ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА МЕТАМАТЕРИАЛОВ Малый С. В., Дежурко А. М., Орлова А. С.	*
5a.16p	ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КОМПОЗИТОВ, ОБЛАДАЮЩИХ МНОГОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРОЙ И СОДЕРЖАЩИХ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ Малый С. В., Орлова А. С.	*
5a.17p	ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ И ОБЪЕМНЫХ СТРУКТУР Иванов С. Н., Семенов Г. А., Бичурин М. И.	901

СЕКЦИЯ 5b/1: НАНОЭЛЕКТРОНИКА И НАНОТЕХНОЛОГИЯ

5b.1	АНСАМБЛИ СПИН-ИНЖЕКЦИОННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАССИВА НАНОПРОВОЛОК Панас А. И., Гуляев Ю. В., Вилков Е. А., Максимов Н. А., Чигарев С. Г., Михайлов Г. М., Черных А. В., Загорский Д. Л., Бедин С. А., Долуденко И. М., Шаталов А. С.	908
5b.2	СИСТЕМА ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ АТОМНОГО ОДНОЭЛЕКТРОННОГО ТРАНЗИСТОРА Гайдамаченко В. Р., Дагесян С. А., Морозова Е. К., Солдатов Е. С.	913
5b.3	НЕЛОКАЛЬНЫЙ РАЗОГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ В DA-рНЕМТ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Пашковский А. Б., Новиков С. И., Мартынов Я. Б., Лукашин В. М., Лапин В. Г.	920
5b.4	ВСПЛЕСК ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ОБРАЩЕННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Пашковский А. Б., Новиков С. И., Маковецкая А. А., Лукашин В. М., Лапин В. Г.	926
5b.5	ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНО- И ДВУХЗАТВОРНЫХ ПОЛЕВЫХ ГРАФЕНОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю.	932
5b.6	КВАНТОВОРАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ТУННЕЛИРОВАНИИ В ВАКУУМНЫХ ДИОДНЫХ И ТРИОДНЫХ СТРУКТУРАХ Давидович М. В., Яфаров Р. К.	938
5b.7p	ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю.	949
5b.8p	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ ВАХ НА УГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУРАХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ И ЕГО ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ Давидович М. В., Яфаров Р. К.	954
5b.9p	МОДЕЛЬ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАНОМЕТРОВЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНКАХ Глумова М. В., Налогин А. Г., Таран Е. П., Зуев С. А.	961

5b.10p	МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В НАНОРАЗМЕРНЫХ МДП-ТРАНЗИСТОРАХ Боровик А. М.	968
5b.11p	ВЛИЯНИЕ ПОДЛОЖКИ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ГРАФЕНА. Ab initio МОДЕЛИРОВАНИЕ Гвоздовский Д. Ч., Баранова М. С., Стемпицкий В. Р.	*
5b.12p	ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ФОСФОРЕН — СЕЛЕНИД МОЛИБДЕНА Скачкова В. А.	*
5b.13p	ФОРМИРОВАНИЕ МАСКИ МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ Коц И. Н.	*
5b.14p	ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ГОРЯЧЕГО ДЭГ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АКУСТИЧЕСКИМИ ФОНОНАМИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ DA-pHEMT С РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ИНДИЯ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ Протасов Д. Ю.	*
5b.16p	ВЕРТИКАЛЬНЫЙ СПИН-ВОЛНОВОЙ ТРАНСПОРТ В ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ МАГНОНИКИ Садовников А. В., Одинцов С. А., Грачев А. А., Бегинин Е. Н., Шараевский Ю. П., Никитова С. А.	*

СЕКЦИЯ 5b/2: НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

5b.17	НАДМОЛЕКУЛЯРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФОТОПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ ФТАЛОЦИАНИНА Казак А. В., Усольцева Н. В., Смирнова А. И., Марченкова М. А., Боднарчук В. В., Яблонский С. В., Холодков И. В.	975
5b.18	ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ АМОРФНЫХ ПОДЛОЖЕК И НАНОМЕТРОВЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК Арсенчев С. П., Глумова М. В., Григорьев Е. В., Зуев С. А., Мазин А. С., Орленсон В. Б., Налогин А. Г., Старостенко В. В., Фитаев И. Ш.	982
5b.19	МАГНИТНЫЙ РЕЛЬЕФ МУЛЬТИФЕРРОИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ Хлопов Б. В., Бондарев Ю. С., Самойлова В. С., Шашурин В. Д.	989
5b.20	ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОПРОВОДОВ АНТИМОНИДА ИНДИЯ В ПОРИСТЫХ МАТРИЦАХ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ Божьев И. В., Горюх Г. Г., Лозовенко А. А., Напольский К. С., Обухов И. А., Позняк А. А., Смирнова Е. А.	996
5b.21	НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В СИСТЕМАХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ Гандилян С. В., Гандилян Д. В.	1003
5b.22	ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЯ С НАНОПОРИСТЫМ АНОДНЫМ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ И РЕЗИСТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ УГЛЕРОДНОЙ НИТИ Врублевский И. А., Чернякова К. В., Горбачев Д. В., Муратова Е. Н., Мошников В. А.	1013

5b.23p	ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ДИНАМИКА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЁНОК АЛЮМИНИЯ Старостенко В. В., Мазинов А. С., Шевченко А. И., Фитаев И. Ш., Борсук А. С.	1017
5b.24p	ВОЗМОЖНОСТИ ПСЕВДОЛЕГИРОВАНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ АМОРФНЫМ УГЛЕРОДОМ Мазинов А. С., Гурченко В. С., Тютюник А. С., Карпенко Н. И.	1022
5b.25p	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ Ni НА МЕМРИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК Ильина М. В., Ильин О. И., Рудык Н. Н., Агеев О. А.	1027
5b.26p	РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ РОСТА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ИЗ СПЛОШНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНК МЕТАЛЛА В СТРУКТУРЕ Ni/Cr/Si Ильин О. И., Ильина М. В., Рудык Н. Н., Федотов А. А.	1034
5b.27p	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПРОВОДОВ АНТИМОНИДА ИНДИЯ В ПОРИСТЫХ МАТРИЦАХ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ Божьев И. В., Горох Г. Г., Карушкин Н. Ф., Лозовенко А. А., Новоселов А. С., Обухов И. А., Румянцев С. В., Смирнова Е. А.	1041
5b.28p	СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ УНТ Жилинский В. В., Романовская А. В., Богомазова Н. В., Галковский Т. В.	*
5b.29p	НАНОРАЗМЕРНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ КОМБИНАЦИЕЙ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ Климин В. С., Солодовник М. С., Агеев О. А.	*
5b.30p	ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaAs ДЛЯ СВЧ УСТРОЙСТВ Климин В. С., Резван А. А., Солодовник М. С., Агеев О. А.	*
5b.31p	ФОРМИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ИОНИЗАЦИОННОГО СЕНСОРА ГАЗОВ МЕТОДАМИ, ИСПОЛЪЗУЮЩИМИ ПЛАЗМУ Климин В. С., Резван А. А., Агеев О. А.	*
5b.32p	ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕВОГО ЭМИТТЕРА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР Климин В. С., Резван А. А., Агеев О. А.	*
СЕКЦИЯ 5b/3: НАНОСЕНСОРЫ, НАНОДЕТЕКТОРЫ, НАНОФОТОНИКА		
5b.33	СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР Крупенин В. А., Божьев И. В., Трифонов А. С., Преснова Г. В., Рубцова М. Ю., Уляшова М. М., Дорофеев А. А., Циняйкин И. И., Преснов Д. Е.	1047
5b.34	НАНОЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСДЮСЕР ДЛЯ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО БИОНАНОСЕНСОРА Мельников А. Е., Солдатов Е. С., Колесов В. В., Кузнецова И. Е.	1053
5b.35	НИЗКОБАРЬЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР Востоков Н. В., Краев С. А., Ревин М. В., Шашкин В. И.	1060

5b.36	НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАНОАНТЕННЫ И МЕТАПОВЕРХНОСТИ Смирнов А. И.	1067
5b.37	ПЕРЕНОС НЕЗАТУХАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ МАССИВАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ Анастасиев А. А., Гозман М. И., Полищук И. Я., Полищук Ю. И.	1070
5b.38	КВАНТОВЫЕ РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НАНОМЕТРОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК Смелова Е. М., Цысарь К. М., Вдовин В. А., Андреев В. Г.	*
5b.39p	ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ НАНОМЕТРОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК В ИК и ТГц ДИАПАЗОНАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ Цысарь К. М., Смелова Е. М., Зеленский В. С., Вдовин В. А., Андреев В. Г.	*
5b.40p	ПОВЕДЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ ВДОЛЬ ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКИ Давидович М. В.	1077
5b.41p	УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ НАНОАНТЕННА Полетаев Д. А., Шадрин А. А., Соколенко Б. В., Нудьга А. А.	1085
5b.42p	АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ, СОДЕРЖАЩИХ КЛАСТЕРЫ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ Малый С. В., Орлова А. С.	*
* Материалы доклада не поступили в Оргкомитет к моменту формирования сборника и будут опубликованы в дополнительном 9-м томе при условии их получения Оргкомитетом не позднее 30 сентября 2018 г.		

Характеристики мощных СВЧ-фотодиодов с барьером Шоттки на основе InAlAs/InGaAs/InP гетероструктур

¹Журавлев К.С., ¹Валишева Н.А., ^{1,2}Аксенов М.С., ¹Дмитриев Д.В.,

¹Торопов А.И., ¹Гишинский А.М., ¹Чистохин И.Б.,

³Малышев С.А., ³Чиж А.Л., ³Микитчук К.Б.

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация

zhur@isp.nsc.ru

² Новосибирский государственный университет

г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация

m.se.aksenov@gmail.com

³ ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

г. Минск, 220072, Республика Беларусь

oelt@oelt.basnet.by

Аннотация: В работе приведено описание технологии изготовления СВЧ-фотодиода с барьером Шоттки и меза-структурой на основе $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ гетероэпитаксиальных слоев. Изучены темновые вольт-амперные характеристики, фототок фотодиодов, а также СВЧ-характеристики. Показано, что темновой ток при обратном смещении 2 В для фотодиодов с диаметром от 10 до 40 мкм не превышает 1×10^{-10} А. Чувствительность фотодиодов различного диаметра с поглощающим слоем InGaAs толщиной 640 нм составляет не менее 0.55 А/Вт. Для фотодиодов Шоттки с диаметром 15 мкм предельная частота равна 28 ГГц, максимальная выходная СВЧ-мощность на частоте 20 ГГц составила величину 58 мВт.

Ключевые слова: СВЧ-фотодиод, 1.55 мкм, InAlAs/InGaAs/InP, барьер Шоттки, ВАХ, чувствительность, СВЧ-мощность.

1. Введение

В аналоговых волоконно-оптических линиях и системах радиофотоники требуются мощные высокоскоростные фотодиоды, работающие в спектральном диапазоне длин волн 1.2-1.6 мкм [1, 2]. Перспективной реализацией такого СВЧ-фотодиода, имеющей ряд существенных преимуществ по сравнению с альтернативными фотодиодными структурами, является меза-фотодиод на основе гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP с барьером Шоттки и микрополосковыми выводами, оптическое излучение на

который подается со стороны подложки [3]. Данная конструкция фотодиода с барьером Шоттки (ФДШ) обладает низким тепловым сопротивлением, так как отвод тепла из области пространственного заряда фотодиода происходит через оба контакта [3]. В ФДШ барьерный контакт покрывает всю фоточувствительную область, поэтому такой фотодиод имеет меньшее контактное сопротивление по сравнению с фотодиодом с традиционным кольцевым контактом, имеющим отверстие по центру для ввода оптического излучения. Более того, в таком фотодиоде при его освещении со стороны контактного n^+ -слоя металлический контакт Шоттки представляет собой зеркало для падающего на фотодиод оптического излучения, что значительно увеличивает эффективную длину поглощения оптического излучения в СВЧ-фотодиоде, имеющем тонкий поглощающий слой.

В рамках данной работы разработана технология изготовления мощных СВЧ-ФДШ с различными предельными частотами (10-40 ГГц) на основе гетероэпитаксиальных слоев (ГЭС) $\text{InAlAs/InGaAs}(0.6\text{-}1.5\text{ мкм})/\text{InP}(001)$, представляющих собой меза-фотодиоды с Au/Ti/n-InAlAs контактом Шоттки различного диаметра и микрополосковыми выводами. Изучены темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ), чувствительность и СВЧ-характеристики фотодиодов с толщиной поглощающего InGaAs слоя 640 нм.

2. Технология изготовления СВЧ-ФДШ на основе InAlAs/InGaAs/InP гетероэпитаксиальных структур

Для выращивания ГЭС использовалась установка молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) *Riber Compact-21t*, оснащенная системами дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) и регистрации эволюции картин ДБЭО, обеспечившими возможность изучения реконструкции поверхности и атомных процессов на ростовых поверхностях подложки InP и эпитаксиальной пленки.

Синтез ГЭС проводился на полуизолирующих подложках $\text{InP}(001)$. Перед выращиванием слоев для получения атомарно чистой поверхности подложки отжигались в потоке мышьяка. Рост слоев InAlAs осуществлялся при температурах 520 °С, InGaAs – при температуре 480 °С. Источники индия, галлия и алюминия калибровались по осцилляциям интенсивности зеркального рефлекса на картинах ДБЭО. Отработка и выбор условий выращивания и легирования слоев InAlAs и InGaAs проводилась на отдельных тестовых образцах, которые анализировались различными методами (атомно-силовая микроскопия, фотолюминесцентная спектроскопия, рент-

геновская дефрактометрия, метод ван дер Пау при 77 и 300 К) [4]. Конструкция синтезируемых ГЭС приведена в таблице 1. Тонкий поглощающий n^+ -InGaAs слой и варизонный InGaAlAs слой используются для устранения эффекта захвата носителей заряда на гетерограницах InAlAs/InGaAs, который может значительно увеличить время переноса фотоносителей и, следовательно, ограничить предельную рабочую частоту фотодиода. Широкозонный нелегированный InAlAs слой служит для увеличения высоты барьера Шоттки, а верхний InGaAs слой защищает барьерный слой от окисления во время технологических процессов, предшествующих процессу напыления контакта Шоттки.

Табл. 1 Структура гетероэпитаксиальных слоёв InAlAs/InGaAs/InP мощного СВЧ-фотодиода

Состав слоя	Толщина слоя	Описание слоя
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	30 нм	Защитный слой
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	30 нм	Барьерный слой
InGaAlAs	50 нм	Варизонный слой
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	600-1500 нм	Нелегированный поглощающий слой
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As:Si } 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$	50 нм	Поглощающий n^+ слой
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As:Si } 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$	300 нм	Контактный слой
InP (001)	~ 400 мкм	Подложка

ФДШ изготавливались на основе InAlAs/InGaAs/InP ГЭС по разработанной технологии. Межа-структуры формировались 2-х стадийным химическим травлением ГЭС в травителе $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:38$. В качестве слоев металлизации омического контакта использовали Ge/Au/Ni/Au (20/40/20/200 нм), барьерного - Ti/Au (20/200 нм). Омический контакт вжигали в атмосфере водорода при температуре 385 °С в течение 5 минут. Защитный диэлектрический слой SiO_2 (800 нм) синтезировали в реакторе пониженного давления при температуре 250 °С. Микрополосковые выводы толщиной 4.5-5 мкм формировались электрохимическим осаждением золота. Для придания структуре механической прочности формировалась пленка из светочувствительного полимера. Затем проводилось утонение подложки InP с помощью механического шлифования и химико-механического полирования для получения зеркально гладкой поверхности, на которую наносился слой просветляющего покрытия из оксида алюминия.

3. Характеристики СВЧ-фотодиодов

Темновые ВАХ СВЧ-ФДШ изучались с помощью анализатора полупроводниковых структур Agilent 1500В и зондовой станции Cascade M150.

Фототок диода измерялся при подаче лазерного излучения с длиной волны 1.55 мкм мощностью до 100 мВт через одномодовое оптическое волокно.

Изготовленные ФДШ с диаметрами 10, 15, 25 и 40 мкм демонстрируют типичные для барьеров Шоттки ВАХ с величиной обратного темнового тока не более 1×10^{-10} А при обратном смещении 2 В. Коэффициент идеальности и высота барьера при нулевом смещении, определенные из ВАХ, составляют 1.2 и 0.7 эВ, соответственно. Анализ зависимостей величины фототока от мощности падающего оптического излучения показал, что чувствительность фотодиодов различного диаметра с толщиной поглощающего InGaAs слоя 640 нм составляет не менее 0.55 А/Вт.

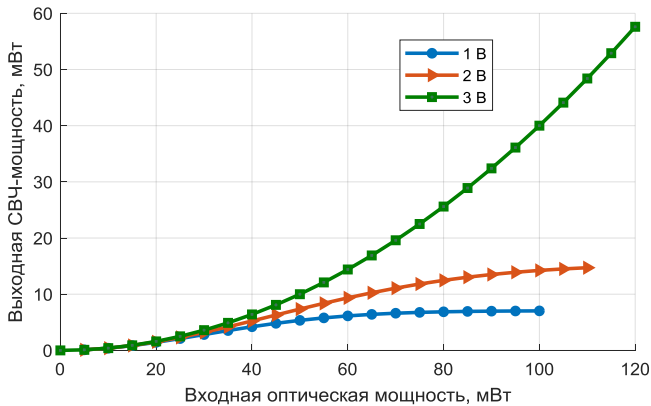


Рис. 1. Зависимость мощности СВЧ-сигнала на выходе InGaAs/InAlAs СВЧ-фотодиода Шоттки с диаметром 15 мкм от входной оптической мощности на частоте 20 ГГц и различных напряжениях обратного смещения.

Для измерения СВЧ-характеристик ФДШ устанавливались в копланарную СВЧ-линию с волновым сопротивлением 50 Ом. Измерение частотной и энергетической характеристик проводилось с помощью векторного анализатора цепей. Один порт анализатора подключался к входному СВЧ-разъему волоконно-оптического лазерного модуля с внешним электрооптическим модулятором Маха-Цендера с предельной частотой 40 ГГц. Второй порт анализатора подключался к копланарной СВЧ-линии с фотодиодом с помощью коаксиального СВЧ-разъема. Модулированное по амплитуде оптическое излучение лазерного модуля на длине волны 1.55 мкм усиливалось оптическим усилителем на легированном эрбием волокне и подавалось с помощью одномодового оптического волокна на фоточувствительную область фотодиода.

Измерения СВЧ-характеристик показали, что предельная частота для ФДШ с диаметром 15 мкм и толщиной поглощающего слоя 640 нм равна 28 ГГц, а максимальная выходная СВЧ-мощность составила величину 58 мВт на частоте 20 ГГц при обратном смещении 3В (рис. 1).

4. Заключение

В рамках данной работы изучены темновые ВАХ, чувствительность и СВЧ-характеристики меза-фотодиодов с Au/Ti/n-InAlAs контактом Шоттки различного диаметра и микрополосковыми выводами на основе гетероэпитаксиальных слоев InAlAs/InGaAs/InP(001). Показано, что фотодиоды характеризуются низкими значениями темнового тока при значениях коэффициента идеальности 1,3 и высоте барьера ~ 0.7 эВ, а чувствительность фотодиодов со слоем InGaAs 640 нм составляет не менее 0.55 А/Вт. Изучение СВЧ-характеристик показало, что разработанная технология позволяет изготавливать мощные СВЧ-ФДШ с различными предельными частотами (10-40 ГГц), работающих в спектральном диапазоне длин волн 1.2-1.6 мкм, для аналоговых волоконно-оптических линий с широким линейным динамическим диапазоном, а также для генерации СВЧ-сигналов оптическими методами в системах радиолокации, радиосвязи и измерительной СВЧ-техники.

Источники финансирования и выражение признательности

Доклад подготовлен по итогам исследования, проведенного при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00548.

Список литературы

- [1] Seeds A.J., Williams K.J. Microwave photonics // J. Lightwave Technology. 2006. Т. 24. №12. С. 4628-4641.
- [2] Малышев С.А., Чиж А.Л., Микитчук К.Б. Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули СВЧ-диапазона и системы радиофотоники на их основе // Материалы 4-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2015. С. 10-18.
- [3] Chizh A., Malyshev S., Mikitchuk K. High-speed high-power InAlAs/InGaAs/InP Schottky photodiode // IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2015). 2015. С. 1-4.
- [4] Чиж, А.Л. Мощный СВЧ-фотодиод Шоттки на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs / А.Л. Чиж, С.А. Малышев, К.Б. Микитчук, К.С. Журавлев, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, М.С. Аксенов, Н.А. Валишева, А.М. Гилинский, И.Б. Чистохин // Сборник статей 7-ой Всероссийской научной конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2018. С. 120-124.

Modern polymers for MM and SubMMW

¹Parshin V.V., ¹Serov E.A., ¹Nikolenko A.S., ²Khatipov S.A.

¹*Institute of applied Physics of RAS
N.Novgorod, 603950, Russian Federation
parsh@appl.sci-nnov.ru*

²*Institute of Organoelement Compounds of RAS
Moscow, 119334, Russian Federation
sakh@mail.ru*

Abstract: *The results of studies of the dielectric parameters (refractive index and $\tan\delta$) of modern polymeric materials - polyethylenes, polypropylenes, lavsan, polyimide, etc. for MM and SubMM wave ranges are presented. Special attention is paid to fluorine-polymers - teflons, and also to modern radiatively modified teflon – Arflon. Its electro-physical parameters are considered.*

Keywords: *MM and SubMM waves, dielectrics, refractive index, $\tan\delta$, fluorine-polymers.*

Современные полимеры для ММ и СубММ ВОЛН

¹ Паршин В.В., ¹ Серов Е.А., ¹ Николенко А.С., ² Хатилов С.А.

¹*Институт прикладной физики РАН
Н.Новгород, 603950, Российская Федерация
parsh@appl.sci-nnov.ru*

²*Институт элементоорганических соединений РАН
Москва, 119334, Российская Федерация
sakh@mail.ru*

Аннотация: *Для диапазонов ММ и СубММ волн представлены результаты исследований диэлектрических параметров (показателя преломления и $\tan\delta$) современных полимерных материалов – полиэтиленов, полипропиленов, лавсана, полиимида и пр. Особое внимание уделено фторзамещённым полимерам – тефлонам, а также современному радиационно модифицированному тефлону – Арфлону для которого вкратце рассматриваются его электрофизические параметры.*

Ключевые слова: *ММ и СубММ волны, диэлектрики, показатель преломления, $\tan\delta$, фторзамещённые полимеры.*

1. Введение

Полимерные материалы широко применяются в технике СВЧ. Это всевозможного вида делители, ответвители мощности, вакуумные окна, диэлектрические волноводы, изоляторы и другие изделия непосредственно взаимодействующие с излучением. Первейшей информацией для расчёта таких устройств является величины поглощения ($\text{tg}\delta$) и показателя преломления, а также их зависимости от частоты и температуры. Для большинства полимеров в ММ и СубММ в диапазоне от ~ 40 ГГц и до ~ 1 ТГц нет каких-либо выраженных частотных особенностей как величины $\text{tg}\delta$ так и показателя преломления. Величина последнего практически постоянна и близка к статической. Величина $\text{tg}\delta$ определяется в основном крыльями линий поглощения в ИК диапазоне и имеет близкий к линейному рост с частотой. Характерные особенности материалов проявляются на частотах выше ~ 1 ТГц [1,2]

Спецификой именно полимерных диэлектриков является «непостоянство» диэлектрических параметров: при номинально одинаковом химическом составе и технологии изготовления величины $\text{tg}\delta$ и показателя преломления заметно отличаются у разных производителей. К этому надо добавить, что диэлектрические параметры существенно зависят от способа изготовления: литьё, прессование, прокат, особенно для тонкопленочных материалов, получающих значительную анизотропию параметров для направлений вдоль и поперёк рулона. Поэтому для расчёта прецизионных устройств необходимо измерять диэлектрические параметры каждой конкретной партии полимерных материалов.

За последние годы достигнуты определенные успехи в получении высококачественных полимерных материалов на основе традиционных углеводородов. Совершенствование технологии производства привело к существенному снижению СВЧ потерь (включая ММ и СубММ диапазоны) в таких материалах как полиэтилены и полипропилены высокого и низкого давления при существенном улучшении их электрофизических параметров. Современные технологии позволили значительно уменьшить содержание «связанной воды» как в полимерах, так и в кварце и кварцевых стёклах. Как было показано ещё в [1] «чем выше концентрация групп ОН тем выше поглощение». Появилась возможность получения пластин высокого качества толщиной в несколько сантиметров для широкополосных вакуумных окон, а также толстых плёнок для изготовления диэлектрических волноводов с минимальными потерями. Следует помнить, что

практически все полимеры, кроме тефлонов, поглощают воду, увеличивая тем самым поглощение ($\text{tg}\delta$). Из традиционных материалов полиимид обладает наибольшей абсорбционной способностью, соответственно: $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ после выдержки несколько дней при нулевой влажности и $\text{tg}\delta = 13 \cdot 10^{-3}$ при 25% влажности (140 ГГц) [3].

В области фторзамещённых полимеров основное внимание уделено классическому Фторопла-сту-4 (Ф-4) и его модификациям различными наполнителями для изменения в нужном направлении его электромеханических свойств. Однако этот путь почти всегда ведёт к увеличению потерь на СВЧ (Таб.3). В последние годы в России в рамках проекта по импортозамещению разработана оригинальная технология радиационной обработки тефлона в результате которой появляются поперечные связи в линейных цепочках полимера, что коренным образом меняет его электрофизические свойства. Получен ряд радиационно модифицированных фторопластов - Арфлонов с различными наполнителями для улучшения тех или иных механических свойств [4]. В нашей работе представлены первые результаты исследований в ММ и СубММ диапазонах показателя преломления и величины $\text{tg}\delta$ его основной модификации – Арфлон А-200 (Таб.2.). Выявлено, что по величине поглощения А-200 не уступает классическому Ф-4, в десятки раз превосходя своего «прародителя» по радиационной и износостойкости, "ползучести" под давлением. Рабочий диапазон температур также существенно больше (Таб.2.) Всё это делает Арфлон весьма перспективным для использования в качестве широкополосных (вследствие малой величины показателя преломления) высоковакуумных окон ММ и СубММ диапазонов.

К настоящему времени есть довольно много публикаций о диэлектрических параметрах полимеров в терагерцовом диапазоне [1-3, 5-7]. В [2] приводятся широкодиапазонные (0.1-10ТГц) измерения популярных полимеров выполненные методами TDS спектроскопии. Однако там основное внимание уделено особенностям в диапазоне выше 1 ТГц. Реально осваиваемому сейчас диапазону ниже 1 ТГц отведено мене 1% общеизвестной информации, к тому же носящей обзорный характер.

В нашей работе приведены подробные результаты измерений показателя преломления и величины $\text{tg}\delta$ современных полимерных материалов в диапазоне 50 ГГц ÷ 360 ГГц, вкратце рассматриваются их основные электрофизические параметры.

2. Объекты исследований

Объектами исследований являлись следующие полимерные материалы производства России и Германии.

- 1) Полиэтилены высокого и низкого давления производства ОАО Казань оргсинтез. Полиэтиленовые плёнки различных модификаций.
- 4) Полиэтилен высокого давления (HDPN) производства FRG
- 5) Фторопласт Ф-4, и его модификации Ф-4МБ, Ф-4К20, Ф-2М.
- 6) Арфлон А-200 производства ООО «НПП «Арфлон» Москва.
- 7) Наименее поглощающие кварцевые стёкла.

3. Методика измерений

Измерения проведены в ИПФ РАН по стандартной методике на резонаторном спектрометре ММ и СубММ диапазонов при комнатных температурах. Измерения проводились на резонансных частотах «толстых» образцов [7,8]. Главной отличительной чертой этого метода измерения является то, что для расчёта величин показателя преломления и $\text{tg}\delta$ не требуется информация о толщине диэлектрика, что весьма удобно для полимерных материалов. Заметим, что измерение толщины тонких (единицы и десятки микрон) полимерных плёнок, имеющих зачастую «гофрированную» поверхность (особенно у рулонных плёнок) это отдельная весьма неопределённая задача. С другой стороны экстраполяция результатов измерений толстых образцов на тонкие плёнки неправомерна [3].

Для измерения диэлектрических параметров изотропных плёночных материалов использовалась довольно сложная методика [9] позволяющая, однако обойтись без информации о толщине.

Таким образом, конкретные величины рассчитываются из измерений только добротностей мод пустого и нагруженного резонатора [9,10] с максимально возможной точностью.

3. Практические результаты

Зависимости величины $\text{tg}\delta$ от частоты (50 ГГц ÷ 360 ГГц) различного класса полимеров представлены на Рис. 1., который даёт общую картину поглощения в современных материалах. Там же приведены зависимости для кварцевых стёкол. Зависимости практическая линейные, их можно экстраполировать как минимум до 500 ГГц. Возможно, увеличение поглощения из-за рассеяния на неоднородностях внутренней структуры по-

лимеров на частотах выше 1 ТГц. Экстраполяция на частоты ниже 20 ГГц может оказаться некорректной из-за смены механизмов поглощения. Представленные на рисунке значения показателя преломления практически неизменны во всём диапазоне измерений. В тоже время разброс значений показателя преломления образцов различных фирм и даже образцов от одной фирмы существенно больше. В Таб. 2. приведены параметры образцов, толщиной 3 мм, из фторопластов различных модификаций. Величина $\operatorname{tg} \delta$ линейно растёт с частотой (Рис.1.), показатель преломления практически постоянен.

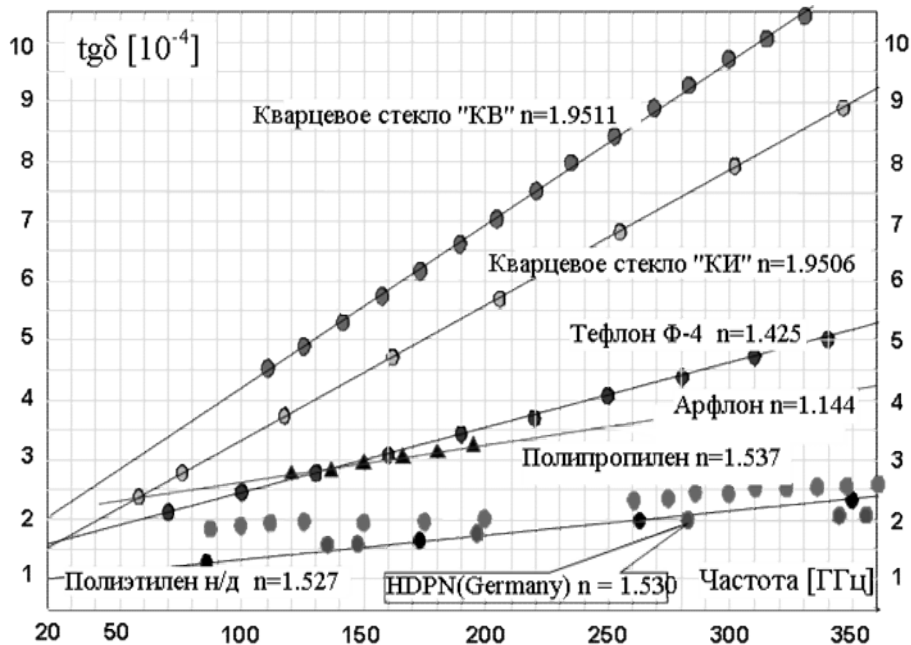


Рис.1. Зависимости величин $\operatorname{tg} \delta$ от частоты различного класса полимеров.

Fig. 1. Loss tangent frequency dependences of different classes of polymers.

Табл. 1. Полиэтилены производства ОАО "Казань Оргсинтез"

Table 1. Polyethylenes produced by "Kazanorgsintez"

Материал. (Частота [ГГц])	n	$\operatorname{tg} \delta [10^{-4}]$	Толщина [мм]
Толстый листовой полиэтилен 153-02К	1.511	3.2	3
Листовой полиэтилен низкого давления марка 271-274К	1.528	4.5	1
Рулонный полиэтилен низкого давления 273-83нд для покрытия скользящей поверхности лыж.	1.527	1.5	1.14
Тоже, с чёрным наполнителем.	1.55	90	1.14
Полиэтиленовая плёнка для теплиц	1.51	4	0.86

Табл. 2. Фторопласты Ф-4 и Арфлон.

Table 2. Fluorine- polymers Ф-4 and Arflon.

Материал	[ГГц]	n	tgδ [10 ⁻⁴]
Тефлон Ф-4 (-CF ₂ -CF ₂ -)n рабочие температуры при умеренных нагрузках от минус 200°C до плюс 100°C.	30→350	1.423-1.430	1.6→5.2
Ф-4МБ Плавкий полимер для литья под давлением и экструзией.	150	1.432	3.7÷3.8
Ф-2М Наибольшая прочность и твердость, рабочие температуры от минус 40°C до плюс 150°C.	120	1.66	500
Ф-4К20 Антифрикционные композиции на основе фторопласта-4, с заполнением коксом.	170	1.518	70
Арфлон А-200 Рабочие температуры при умеренных нагрузках от минус 260°C до плюс 250°C.	100→200	1.144	2.6→3.2

4. Заключение

Для ряда современных полимеров представлены широкодиапазонные зависимости диэлектрических параметров. Показано, что величина tgδ практически линейно растёт с ростом частоты. Результат измерений можно экстраполировать вниз до частот ~ 20 ГГц. Ниже возможна смена механизмов поглощения и экстраполяция будет не верна.

Вверх по частоте, по крайней мере до 700-800 ГГц не ожидается никаких особенностей, поэтому экстраполяция будет адекватна. Возможно, что ближе к 1 ТГц возникнет рассеяние на неоднородностях внутренней структуры полимеров, увеличивающее общие потери, но это уже отдельная задача для исследований.

Источники финансирования и выражение признательности

Доклад подготовлен по итогам исследования проведенного в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Нижегородской области №. 18-42-520015 p_a.

Список литературы

- [1] Субмиллиметровая диэлектрическая спектроскопия твёрдого тела // Труды ИОФ АН. 1990, Т. 25. -М. «Наука».
- [2] Paul D. Cunningham, Nestor N. Valdes, Felipe A. Vallejo, L. Michael Hayden, Brent Polishak, Xing-Hua Zhou, Jingdong Luo, Alex K.-Y. Jen, Jarrod C. Williams, and Robert J. Twieg. Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials // J. Appl. Phys. 2011, V. 109, P. 043-505.
- [3] Паршин В. В. Серов Е. А. Резонаторные методы исследования газов и конденсированных сред в ММ и СубММ диапазонах / 20-th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" 2010, P. 21-27.

- [4] Хатилов С.А., Конова Е.М., Артамонов Н.А. Радиационно-модифицированный политетрафторэтилен: структура и свойства // Росс. химический журнал (РЖХО им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. 52. № 5. С. 64-72.
- [5] Richard D. Hollinger, K. A. Jose, Anilkumar Tellakula, V. V. Varadan, and V. K. Varadan characterization of dielectric materials from 8 to 110 GHz using a free space setup // *Microwave and optical technology lett.* 2000, V. 26, No. 2, P. 100-105.
- [6] V.V.Meriakri. Low-loss materials for application in millimeter and submillimeter wave range. / in book *The Science and Technology of Millimetre Wave Components and Devices.* ed. By V.E. Lyubchenko, 2001. V 12, P 117-132.
- [7] В.В.Паршин, М.Ю.Третьяков, М.А. Кошелев, Е.А.Серов. "Аппаратурный комплекс и результаты прецизионных исследований распространения ММ и СубММ волн в конденсированных средах и атмосфере" // Изв. вузов. Радиофизика. 2009, Т. 52, № 8, С. 583-594.
- [8] V.V. Parshin, M.Yu. Tretyakov, M.A. Koshelev, E.A. Serov. Modern resonator spectroscopy at submillimeter wavelengths. *IEEE Sensors Journal* // 2013, V.13, № 1, P. 18-23.
- [9] С. Н. Власов, В. В. Паршин, Е. А. Серов. Методы исследования тонких диэлектрических пленок в миллиметровом диапазоне // ЖТФ, 2010, Т. 80, № 12, с.73-79.
- [10]] В.В. Паршин, Е.А. Серов. Метод измерения и диэлектрические параметры пленочных материалов для ММ диапазона. // 18-th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2008). 2008, P. 753-754.

References

- [1] Submillimeter dielectric spectroscopy of solids. –Moscow: Nauka, 1990. (In Russian).
- [2] Paul D. Cunningham, Nestor N. Valdes, Felipe A. Vallejo, L. Michael Hayden, Brent Polishak, Xing-Hua Zhou, Jingdong Luo, Alex K.-Y. Jen, Jarrod C. Williams, and Robert J. Twieg. Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials. *J. Appl. Phys.* 2011, vol. 109, pp. 043-505.
- [3] Parshin V.V., Serov E.A. [Gas and condensed media investigation in MM and SubMM ranges] *20-th Int. Crimean C. Microwave & Telecommunication Techn.* 2010, pp. 21-27.
- [4] Khatipov S.A., Konova E.M., Artamonov N.A. [Radiation-modified polytetrafluoroethylene: structure and properties] *Russian chem. J.* 2008. vol. 52. no 5. pp. 64-72. (In Russian).
- [5] Richard D. Hollinger, K. A. Jose, Anilkumar Tellakula, V. V. Varadan, and V. K. Varadan characterization of dielectric materials from 8 to 110 GHz using a free space setup. *Microwave and optical technology letter.* 2000, vol. 26, No. 2, pp. 100-105.
- [6] V.V.Meriakri. Low-loss materials for application in millimeter and submillimeter wave range. in book *The Science and Technology of Millimetre Wave Components and Devices.* ed. By V.E. Lyubchenko, 2001. vol 12, pp 117-132.
- [7] Parshin V.V., Tretyakov M.Yu., Koshelev M.A., Serov E.A. [Instrumental complex and the results of precise measurements of MM and SubMM wave propagation in condensed media and atmosphere] *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2009, vol. 52, no. 8, pp. 525-535.
- [8] V.V. Parshin, M.Yu. Tretyakov, M.A. Koshelev, E.A. Serov. Modern resonator spectroscopy at submillimeter wavelengths. *IEEE Sensors J.* 2013, vol.13, no.1, pp. 18-23.
- [9] S.N. Vlasov, V.V. Parshin, E.A. Serov. [Method of thin dielectrics films investigation in MM wave region] *J. Tech. Phys.*, 2010, vol. 55, no.12, pp. 1781-1787. (In Russian).
- [10] Parshin V.V., Serov E.A. [Method of measurement and dielectric parametresog film materialsfor MM range] *18-th Int. Crimean C. Microwave & Telecommunication Techn.* 2008, pp. 753-754.

Влияние импульсного магнитного поля на структуру и свойства стронцийзамещённого бариевого гексагонального феррита для СВЧ техники

¹ Коровушкин В.В., ² Степович М.А., ³ Шипко М.Н., ³ Труханов А.В.

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

г. Москва, 119049, Российская Федерация

krvsch@mail.ru

² Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского

г. Калуга, 248023, Российская Федерация

m.stepovich@rambler.ru

³ Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

г. Иваново, 153003, Российская Федерация

michael-1946@mail.ru

Аннотация: Исследованы образцы стронцийзамещённого бариевого гексагонального феррита. Установлено, что после воздействия 30 импульсами магнитного поля достигается наиболее высокий уровень упорядочения катионных вакансий и наиболее существенное (более чем в 5 раз) уменьшение коэрцитивной силы в сравнении с незаменённым гексагональным ферритом бария. Сделано предположение о том, что в результате магнитоимпульсного воздействия ускоряется диффузионная подвижность ионов, что является причиной обеднения одних областей феррита и пересыщения других катионными вакансиями. Следствием такого процесса является изменение локальной структуры феррита и уменьшение его коэрцитивной силы до уровня, требуемого для СВЧ материалов.

Ключевые слова: слабое импульсное магнитное поле, стронцийзамещённый бариевый феррит, материалы СВЧ техники, коэрцитивная сила.

1. Введение

Повышение эксплуатационных параметров материалов является важной технологической задачей, которая может быть решена различными методами. Наиболее известными и широко используемыми являются следующие классические методы: упрочнение легированием, упрочнение пластическим деформированием, упрочнение термическими методами, в т.ч. поверхностная закалка, обработка лазером и электроискровое легирование, некоторые другие (цементация или азотирование стали, нитроцементация и т.п.) [1-3], а также плазменная обработка (см., например, [4-9]).

Возможно использование и иных, в настоящее время ещё не нашедших широкого промышленного применения, но весьма перспективных и экономичных методов повышения эксплуатационных характеристик материалов, основанных на использовании электромагнитных излучений [10, 11], сравнительно просто реализуемых [12] и не требующих использования дорогостоящего оборудования [12-14]. Длительное время считалось, что магнитное поле (даже сильное) не может оказать существенного влияния на процессы реконструкции кристаллической решетки металлов, сплавов, оксидов металлов [11]. Однако, по данным отечественных и зарубежных авторов, если воздействие поля осуществляется на материалы с отличными от нуля магнитными моментами атомов, ситуация может измениться даже в относительно слабых полях [10, 11] и в этом смысле весьма эффективным и перспективным способом воздействия на состояние дефектов является использование слабых импульсных электрических или магнитных полей. Ранее [12-14] показано, а в [15-19] для различных материалов нами подтверждено, что импульсные электромагнитные воздействия могут приводить к существенным изменениям в структуре и свойствах твёрдых тел. Исследовано влияние магнитоимпульсной обработки (МИО) на порошки гематита и магнетита, являющиеся исходным сырьём для производства электротехнических изделий [15-17]; рассмотрено влияние МИО на прецизионные сплавы системы Fe-Si-Al, используемые при производстве устройств и приборов точной механики [13, 14, 18], на фольгу электротехнической стали [19, 20], а также на ферриты различных составов [21-25]. В настоящей работе продолжено изучение МИО на структуру и свойства конденсированного вещества: изучение возможностей такого воздействия на стронцийзамещённые бариевые гексагональные ферриты и составляет предмет настоящей работы.

2. Объекты исследований и методика эксперимента

Исследованы поликристаллические гексагональные стронцийзамещённые бариевые ферриты, для которых обнаружено нарушение коллинеарности в расположении спиновых магнитных моментов ионов Fe^{3+} . Для изучения особенностей кристаллической структуры феррита до и после магнитоимпульсного воздействия использовали результаты мёссбауэровских исследований, выполненных на спектрометре MS 1104-Em с обработкой спектров по программе Univem MS. Обработку ферритов осуществляли в импульсном магнитном поле напряжённостью 10-30 кА/м с длительностью импульсов 0,1-0,2 с и интервалом между импульсами 1-2 с. Маг-

нитные параметры: намагниченность насыщения, коэрцитивную силу, остаточную намагниченность, форму петли гистерезиса – измеряли при комнатной температуре на вибрационном магнитометре VSM 250 в магнитном поле напряженностью 20 кЭ.

3. Результаты исследований

Результаты исследований ядерного гамма-резонанса указывают на изменение параметров мёссбауэровских спектров ферритов после их МИО. Изменения связаны с преимущественной локализацией замещающих ионов в гексагональном блоке (позиции $2b$ и $4f_2$), а также с упорядочением катионных вакансий. Это способствует ослаблению обменных взаимодействий между ионами Fe^{3+} , что является причиной неколлинеарности их спиновых моментов, а также уменьшения коэрцитивной силы феррита. После воздействия 30 импульсами магнитного поля достигается наиболее высокий уровень упорядочения катионных вакансий и наиболее существенное (более чем в 5 раз) уменьшение коэрцитивной силы в сравнении с незамещённым гексагональным ферритом бария. Эти изменения связаны с ослаблением интенсивности взаимодействия доменных стенок феррита с дислокациями в результате их упорядочения. Сделано предположение о том, что в результате воздействия импульсов магнитного поля ускоряется диффузионная подвижность ионов, что является причиной обеднения одних областей феррита и пересыщения других катионными вакансиями. Следствием такого процесса является изменение локальной структуры феррита и уменьшение его коэрцитивной силы до уровня, требуемого для СВЧ материалов.

4. Заключение

Установлено, что после воздействия 30 импульсами магнитного поля достигается наиболее высокий уровень упорядочения катионных вакансий и наиболее существенное (более чем в 5 раз) уменьшение коэрцитивной силы в сравнении с незамещённым гексагональным ферритом бария. Предположено, что в результате воздействия импульсов магнитного поля ускоряется диффузионная подвижность ионов, что является причиной обеднения одних областей феррита и пересыщения других катионными вакансиями, в результате чего происходит изменение локальной структуры феррита и уменьшение его коэрцитивной силы до уровня, требуемого для СВЧ материалов.

Источники финансирования и выражение признательности

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00515), гранта РФФИ и правительства Ивановской области (проект № 18-43-370012) и гранта РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001). Авторы также благодарят Е.С. Савченко (НИТУ «МИСиС», г. Москва) за проведение исследований магнитных характеристик ферритов.

Список литературы

- [1] Бородавко В.И., Ивашко В.С., Клименко С.А., Хецфец М.Л. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / Ред. М.Л. Хецфец, С.А. Клименко. Минск: Беларус. навука, 2013. 463 с.
- [2] Бурцев В.М., Васильев А.С., Гемба И.Н. и др. Технология машиностроения: учебн. для вузов: в 2 т. / Ред. А.М. Дальский, А.И. Кондаков. Т. 1. Основы технологии машиностроения. 3-е изд., испр. и перераб. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 478 с.
- [3] Горобей Н.Н., Лукьяненко А.С. Упрочнение поверхностного слоя металлических образцов легированием // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 4-й международной научно-практической конференции. – СПб.: СПбГПУ, 2014. С. 1119–1128.
- [4] Воробьев В.Ф., Помельникова А.С., Шипко М.Н., Степович М.А. Исследование влияния коронного и тлеющего разрядов на прочностные и химические свойства сталей // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 12. С.88-92.
- [5] Vorobyov V.F., Pomel'nikova A.S., Shipko M.N., Stepovich M.A. Using Corona and Glow Discharges for Improving Strength Properties and Corrosion Resistance of Steel // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2011. V. 5. No. 6. P. 1208-1211.
- [6] Шипко М.Н., Костишин В.Г., Степович М.А., Коровушкин В.В. Модификация свойств ферритовых материалов с гексагональной структурой при обработке в плазме коронного разряда // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 1. С. 89-93.
- [7] Shipko M.N., Kostishin V.G., Stepovich M.A., Korovushkin V.V. Modifying the properties of ferrite materials with a hexagonal structure via treatment in corona discharge plasma // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. January 2017. V. 11. Issue 1. P. 142-145.
- [8] Степович М.А., Шипко М.Н., Костишин В.Г., Коровушкин В.В. Влияние коронного разряда на характеристики супердисперсных частиц магнетита // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 2. С. 32-35.
- [9] Stepovich M.A., Shipko M.N., Kostishin V.G., Korovushkin V.V. Influence of Corona Discharge on the Characteristics of Superdispersed Magnetite Particles // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. January 2017. V. 11. Issue 1. P. 194-196.
- [10] Алышиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы. Кристаллография. 2003. Т. 48. № 5. С. 826-854.
- [11] Шипко М.Н., Помельникова А.С., Шипко Г.А. Физико-химические особенности технологий поверхностного упрочнения сталей и сплавов. Иваново: ИГЭУ, 2008. 144 с.

- [12] Староверов Б.А., Степович М.А., Шипко М.Н. Автоматизация процессов импульсной магнитной обработки металлов и прецизионных сплавов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 8. С.1-4.
- [13] Шипко М.Н., Степович М.А., Полетаев В.А., Костюк В.Х. О влиянии слабых импульсных магнитных полей на процессы упорядочения в прецизионных сплавах системы Fe-Si-Al // Вестник ИГЭУ. 2011. Вып. 5. С.49-51.
- [14] Шипко М.Н., Степович М.А., Староверов Б.А., Костюк В.Х. Влияние слабых низкочастотных импульсных магнитных полей на физико-механические свойства металлов и прецизионных сплавов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 1. С. 2-6.
- [15] Вирюс А.А., Шипко М.Н., Степович М.А., Коровушкин В.В. Комплексный микроанализ состава и структуры порошков гематита // Прикладная физика. 2018. № 1. С. 63-68.
- [16] Степович М.А., Шипко М.Н., Коровушкин В.В., Костишин В.Г. О влиянии импульсов магнитного поля на структуру и свойства магнетита // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 8. С. 1152-1156.
- [17] Stepovich M.A., Shipko M.N., Korovushkin V.V., Kostishin V.G. Effect of Magnetic Field Pulses on the Structure and Properties of Magnetite // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. V. 81. No. 8. P. 1037-1040.
- [18] Вирюс А.А., Каминская Т.П., Шипко М.Н., Степович М.А. Локальный анализ состава и структуры прецизионных сплавов системы Fe-Si-Al, подвергнутых магнитно-импульсной обработке // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 2. С.71-75.
- [19] Вирюс А.А., Каминская Т.П., Степович М.А., Коровушкин В.В., Шипко М.Н., Тихонов А.И., Попов В.В. Исследование локальных характеристик аморфной электротехнической стали // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 10. С. 52-55.
- [20] Virus A.A., Kaminskaya T.P., Stepovich M.A., Korovushkin V.V., Shipko M.N., Tikhonov A.I., and Popov V.V. Investigation of the Local Characteristics of Amorphous Electrical Steel // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2017. V. 11. Issue 5. P. 1046-1049.
- [21] Shipko M.N., Kostishyn V.G., Korovushkin V.V., Isaev I.M., Stepovich M.A., Tikhonov A.I., Savchenko E.S. Magnetic properties and local parameters of crystal structure for BaFe₁₂O₁₉ and SrFe₁₂O₁₉ hexagonal ferrites // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2016. V. 8. No. 3. P. 03004.
- [22] Коровушкин В.В., Костишин В.Г., Степович М.А., Шипко М.Н. Влияние магнитоимпульсной обработки на магнитные характеристики иттриевых ферритов-гранатов // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 12. С. 1643-1648.
- [23] Korovushkin V.V., Kostishyn V.G., Stepovich M.A., Shipko M.N. Effect of Magnetic Pulse Treatment on the Magnetic Characteristics of Yttrium–Iron Garnets // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2016. V. 80. Issue 12. P. 1450-1454.
- [24] Шипко М.Н., Коровушкин В.В., Костишин В.Г., Исаев И.М., Степович М.А., Савченко Е.С. Влияние магнитоимпульсной обработки на структуру и магнитные свойства ферритов // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 2. С. 232-236.
- [25] Shipko M.N., Korovushkin V.V., Kostishin V.G., Isaev I.M., Stepovich M.A., and Savchenko E.S. Effect of Magnetic Pulse Processing on the Structure and Magnetic Properties of Ferrites // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2018. V. 82. No. 2. P. 203-207.

Interface states in microwave photonic heterostructures based on finlines

¹Usanov D.A., ²Nikitov S.A., ¹Skripal A.V., ¹Ryazanov D.S.

¹Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky
83 Astrakhanskaya Street, Saratov, 410012, Russia
usanovda@info.sgu.ru

²Institute of Radio-engineering and Electronics of RAS n.a. V.A. Kotelnikov RAS
7 Building, 11 Mohovay str., Moscow, 125009, Russia
nikitov@cplire.ru

Abstract: The appearance of localized states in the photonic crystal composed of two series-connected Bragg structures made in the form of finlines with different sizes of elementary cells has been investigated. Localized states on the boundary of two Bragg structures appear only when there is an interface element on this boundary with characteristics different from the characteristics of both one and the other Bragg structures.

Keywords: microwave photonic heterostructures, Bragg structures, localized states, finline.

Интерфейсные состояния в СВЧ фотонных гетероструктурах на основе волноводно-щелевых линий

¹Усанов Д.А., ²Никитов С.А., ¹Скрипаль А.В., ¹Рязанов Д.С.

¹ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия
usanovda@info.sgu.ru

²ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН
ул. Моховая 11, корп. 7, г. Москва, 125009, Россия
nikitov@cplire.ru

Аннотация: Исследовано возникновение локализованных состояний в фотонном кристалле, составленном из двух последовательно соединенных брэгговских структур, имеющих разные размеры элементарных ячеек и выполненных в виде волноводно-щелевых линий передачи. Локализованные состояния на границе двух брэгговских структур возникают лишь при наличии на этой границе интерфейс-

ного элемента с характеристиками, отличными от характеристик как одной, так и другой брэгговской структуры.

Ключевые слова: СВЧ фотонные гетероструктуры, брэгговские структуры, локализованные состояния, волноводно-щелевая линия.

1. Введение

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 или отрицательной магнитной проницаемостью. При этом на АЧХ фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем, наблюдается узкий пик коэффициента прохождения электромагнитной волны [1, 2]. Возникновение локализованных состояний на краю фотонного кристалла, ограниченного пленкой нанопористого серебра, описано авторами [3]. Локализованные состояния могут также встречаться на границе двух соединенных фотонных кристаллов с различными размерами элементарных ячеек при перекрытии запрещенных зон этих двух кристаллов [1, 4].

2. СВЧ фотонные гетероструктуры: численный расчет и эксперимент

Отличительной особенностью фотонных кристаллов СВЧ-диапазона является высокая технологичность их производства, при этом в качестве периодически повторяющихся элементов СВЧ фотонного кристалла могут быть использованы отрезки различных типов линий передачи.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей возникновения локализованных состояний на границе двух фотонных кристаллов без нарушений, выполненных в виде волноводно-щелевых линий передачи, при наличии интерфейсного слоя на границе двух фотонных кристаллов.

В центре поперечного сечения прямоугольного волновода X -диапазона ($22.86 \text{ mm} \times 10.16 \text{ mm}$) в E -плоскости размещались две группы периодически расположенных отрезков щелевой линии передачи, образующих в совокупности брэгговскую гетероструктуру.

Щелевая линия первой подсистемы брэгговской гетероструктуры выполнена на поликоровой (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9,6$) пластине длиной $L_1 = 15 \text{ mm}$, шириной 10.16 mm и толщиной 1 mm . На одну сторону пластины было

нанесено золотое покрытие толщиной 0.01 mm, ширина щели в покрытии составляла $s=4.0$ mm. Отрезки первой подсистемы волноводно-щелевой линии передачи разделялись отрезками регулярного волновода длиной $d_1=10$ mm. Длина отрезков волноводно-щелевой линии второй подсистемы брэгговской гетероструктуры составляла $L_2=13$ mm, а длина отрезков регулярного волновода $d_2=15$ mm. Каждая из подсистем брэгговской гетероструктуры состояла из четырех отрезков щелевой линии.

Численный расчет коэффициентов отражения и прохождения выполнялся с использованием программного обеспечения для трехмерного моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов ANSYS HFSS.

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

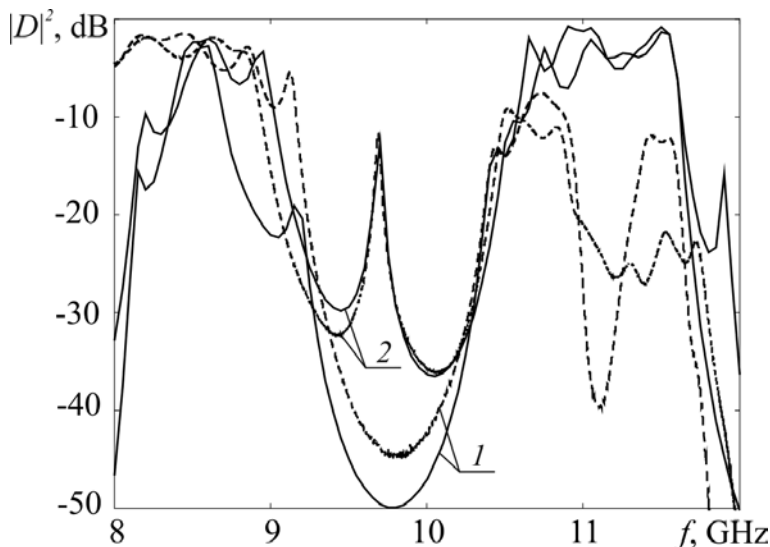
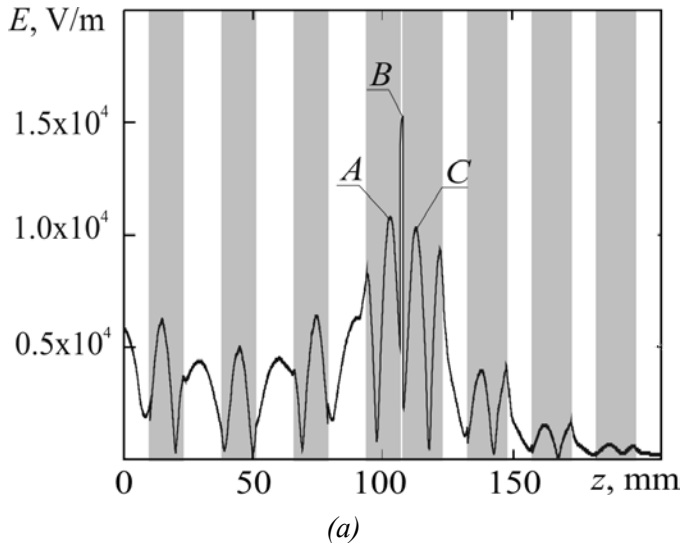


Рис. 1. Экспериментальные (штриховые кривые) и расчетные (сплошные кривые) частотные зависимости коэффициентов прохождения $|D|^2$ для брэгговской гетероструктуры при различной длине интерфейсного слоя l , mm: 1–10 mm, 2–1 mm

Fig. 1. The experimental (dashed curves) and calculated (solid curves) frequency dependences of the transmission coefficients $|D|^2$ for the Bragg heterostructure at different length of the interface layer l , mm: 1–10 mm, 2–1 mm

Как следует из результатов эксперимента и расчета, при длине l регулярного отрезка волновода, соединяющего две брэгговские структуры и играющего роль интерфейсного слоя, равной длине регулярных отрезков первой или второй брэгговской структур, АЧХ фотонной брэгговской гетероструктуры, которую можно называть «идеальной» брэгговской структурой, характеризуется наличием запрещенной зоны с коэффициентом пропускания, достигающим -45 dB (см. кривые 1 на рис. 1). При этом на АЧХ «идеальной» брэгговской гетероструктуры в запрещенной зоне не наблюдался пик коэффициента прохождения электромагнитной волны, связанный с возникновением локализованного состояния. При длине интерфейсного слоя l , равной 1 мм, пик прохождения электромагнитной волны возникал в середине запрещенной зоны (кривые 2 на рис. 1) фотонной гетероструктуры. Результаты расчета демонстрируют локализованную на интерфейсной границе двух последовательно соединенных брэгговских структур пучность распределения электрического поля электромагнитной волны с максимальной напряженностью (см. рис. 2). Анализ распределения поля в плоскостях поперечного сечения волновода, проходящих через пучности стоячей волны на отрезках волноводно-щелевой линии первой и второй последовательно соединенных брэгговских структур и через пучность на интерфейсной границе, свидетельствует о существенной локализации поля в середине широкой стенки волновода.



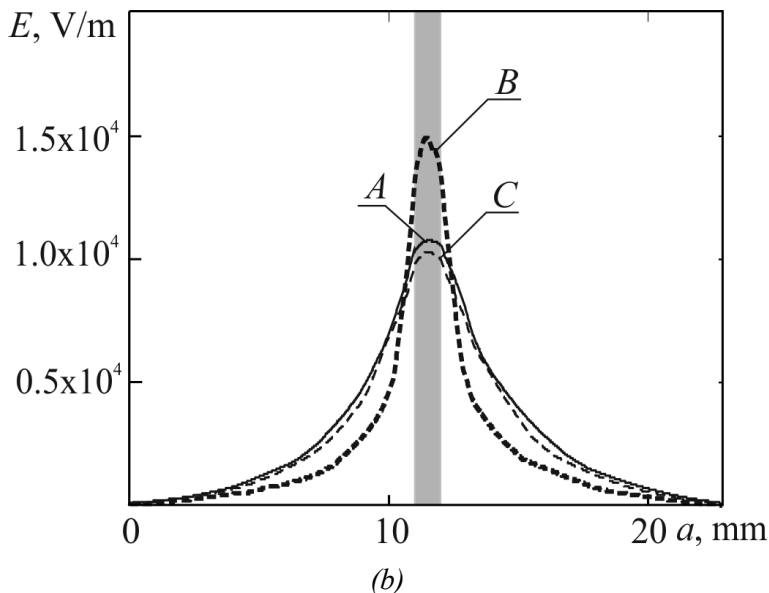


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри брэгговской гетероструктуры на частоте, соответствующей пику коэффициента прохождения электромагнитной волны в запрещенной зоне: *a* — вдоль направления распространения электромагнитной волны; *b* — в плоскостях поперечного сечения волновода (*A*, *B*, *C*) на рис. 2, *a*. Частота пика пропускания = 9.686 GHz. Темным цветом на рис. 2, *a* отмечены области, которые заняты отрезками волноводно-щелевой линии передачи, светлым обозначены области, занятые регулярными отрезками волновода

Fig. 2. The distribution of the electromagnetic wave electric field density inside the Bragg heterostructure at a frequency corresponding to the of the transmission coefficient peak in the forbidden band: *a* – along the direction of the electromagnetic wave propagation; *b* – in the cross section plane of the waveguide (*A*, *B*, *C*) in Fig. 2, *a*. Transmission peak frequency 9.686 GHz. In Fig. 2, *a* the areas occupied by segments of finline are marked by dark color, the areas occupied by segments of regular waveguide are marked with white color

3. Заключение

Таким образом, экспериментально исследовано возникновение локализованных состояний в фотонном кристалле, составленном из двух последовательно соединенных брэгговских структур, имеющих разные размеры элементарных ячеек и выполненных в виде волноводно-щелевых линий передачи. Сравнение результатов эксперимента и расчетных данных свидетельствует об их хорошем количественном совпадении. Установлено, что в «идеальной» брэгговской гетероструктуре локализованные

состояния не возникают. Локализованные состояния на границе двух брэгговских структур возникают лишь при наличии на этой границе интерфейсного элемента с характеристиками, отличными от характеристик как одной, так и другой брэгговской структуры.

Источники финансирования и выражение признательности

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

Список литературы

- [1] Vinogradov A.P., Dorofeenko A.V., Merzlikin A.M., Lisyansky A.A. Surface states in photonic crystals // *Physics–Uspekhi*. 2010. Vol. 53. №3. P. 243–256.
- [2] 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. Vol. 101, Issue 11. P. 113902 (1)–113902 (3).
- [3] Bikbaev R.G., Vetrov S.Ya. and Timofeev I.V. The optical Tamm states at the interface between a photonic crystal and nanoporous silver // *Journal of Optics*. 2017. № 19. P. 015104.
- [4] 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, № 23. P. 233102(1)–233102(4).

References

- [1] Vinogradov A.P., Dorofeenko A.V., Merzlikin A.M., Lisyansky A.A. Surface states in photonic crystals // *Physics–Uspekhi*, 2010, vol. 53, no. 3, pp. 243–256.
- [2] 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, vol. 101, no. 11 pp. 113902 (1)–113902 (3).
- [3] Bikbaev R.G., Vetrov S.Ya. and Timofeev I.V. The optical Tamm states at the interface between a photonic crystal and nanoporous silver // *Journal of Optics*, 2017, no. 19, p. 015104.
- [4] 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, no. 23, pp. 233102(1)–233102(4).

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state task No. 8.7628.2017/BCH).

Effect of flame retardant impregnations on properties of radio absorbing materials based on elastic polyurethane foam

^{1,2} Semkin A.O., ¹ Visakh P.M., ¹ Rezaev I.A., ^{1,2} Fateev A.V.

¹ Tomsk state university of control systems and radioelectronics
Tomsk, 634050, Russian Federation
a.o.semkin@gmail.com

² LLC RPC «TESART»
Tomsk, 634050, Russian Federation
sao@tes-art.ru

Abstract: In this work we present the results of experimental studies of the influence of the composition and concentration of some flame retardant impregnations on the reflecting and absorbing properties of structural radio-absorbing materials based on elastic polyurethane foam used in the construction of radio-frequency anechoic chambers.

Keywords: radio absorbing material, elastic polyurethane foam, flame retardant, anechoic chambers, radio wave absorption, reflection of radio waves.

Влияние антипиреновых пропиток на свойства радиопоглощающих материалов на основе эластичного пенополиуретана

^{1,2} Семкин А.О., ¹ Висах П.М., ¹ Резаев И.А., ^{1,2} Фатеев А. В.

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
г. Томск, 634050, Российская Федерация
a.o.semkin@gmail.com

² ООО НПК «ТЕСАРТ»
г. Томск, 634050, Российская Федерация
sao@tes-art.ru

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований влияния состава и концентрации некоторых антипиреновых пропиток на отражающие и поглощающие свойства конструкционных радиопоглощающих материалов на основе эластичного пенополиуретана, используемых при строительстве радиочастотных безэховых камер.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, эластичный пенополиуретан, антипирен, безэховые камеры, поглощение радиоволн, отражение радиоволн.

1. Введение

Бурное развитие радиоэлектронной промышленности требует создания множества испытательных комплексов, предназначенных для измерения радиотехнических характеристик антенн и антенных решеток, а также проведения испытаний на электромагнитную совместимость различных технических средств. Наибольшее распространение в настоящее время получили комплексы на основе радиочастотных безэховых камер, внутреннее пространство которых изолировано от внешнего радиоэфира, и дополнительно приняты меры по снижению уровней мощности переотраженных радиоволн. Этим целям служат радиопоглощающие материалы (РПМ), которыми облицовываются стены таких камер. Одними из наиболее эффективных являются материалы на основе вспененного полиуретана с углеродным наполнителем, которые в силу своей пористой структуры обеспечивают, во-первых, эффективное согласование со свободным пространством, а во-вторых, высокий уровень омических и магнитных (в зависимости от наполнителя) потерь. Их наиболее существенным недостатком является высокая степень горючести, характерная для полиуретанов. Следовательно, весьма актуальной является разработка композиций, позволяющих снизить восприимчивость РПМ к воздействию пламени и высоких температур, и, соответственно, снижающих риск возникновения пожаров. Разработке огнестойких (антипиреновых) пропиток и добавок для полиуретанов посвящено множество работ по всему миру [1-4 и др.]. С другой стороны, ключевым свойством таких веществ должна быть способность сохранять проводящие свойства материала, необходимые для выполнения его основной роли – поглощения радиоволн. Однако, широко известных работ, посвященных данной проблематике, нет. В связи с этим, целью данной работы является изучение влияния различных антипиреновых пропиток на поглощающие свойства РПМ.

2. Выбор и обоснование состава пропиток

На момент проведения экспериментов коммерчески доступными являлись следующие вещества:

- борная кислота (boric acid, BA);
- декагидрат тетрабората натрия (borax, BX);
- фосфат бора (boron phosphate, BP);

- полифосфат меламина (melamine polyphosphate, MPF);
- полифосфат магний меламина (MPF-Mg);
- синтетический цеолит NaA (zeolite);
- гидрокарбонат натрия, пищевая сода (soda).

Для определения перечня используемых веществ были проведены предварительные испытания на горючесть образцов РПМ из эластичного пенополиуретана, пропитанного в указанных веществах.

Испытания на горючесть проводились следующим образом. Из панелей радиопоглощающего материала AMP-20 производства ООО НПК «ТЕСАРТ» вырезались образцы для испытаний. Готовился водный раствор испытуемого вещества, содержащий ПАВ (неопреновый клей) для улучшения адгезионных свойств антипирена, в растворе пропитывался образец, далее он высушивался и подвергался испытаниям на воздействие пламени. В экспериментах образцы подвергались воздействию пламени бытовой газовой горелки, высота пламени не превышала 10 см (100 мм), в течение 30 секунд. В случае воспламенения образца (появления открытого пламени) испытания прекращались, раствор исключался из дальнейших испытаний. В случае отсутствия открытого пламени по истечении 30 секунд воздействия, воздействие пламени прекращалось, образец выкладывался на горизонтальную поверхность, измерялось время тления образца. Под тлением образца понималось активное выделение дыма и сохранение высокой температуры (температура в предварительных тестах не измерялась). Композиция принималась годной к дальнейшим испытаниям, если тление (активное выделение дыма) прекращалось по истечении 1-2 минут.

Таким образом, было отобрано 13 композиций, содержащих испытуемые вещества. Экспериментальные исследования влияния антипиренов на свойства радиопоглощающих материалов проводились для указанных композиций.

3. Методика исследований

Исследование влияния состава и концентрации антипиреновых пропиток на свойства РПМ проводилось следующим образом. Из двух панелей плоского радиопоглощающего материала из эластичного пенополиуретана AMF-5 (500x500x50 мм) производства ООО НПК «ТЕСАРТ» вырезались экспериментальные образцы размерами 50x23x10 мм. Затем образцы помещались в волноводную секцию стандартного сечения (23x10). Волноводная секция через коаксиально-волноводные переходы подключалась к двум портам векторного анализатора цепей (ВАЦ). С его помощью измерялись комплексные S-параметры в диапазоне частот 8-12 ГГц. Пред-

варительно производилась калибровка ВАЦ и измерение S-параметров волноводной секции, не содержащей образец РПМ. Полученные экспериментальные результаты принимались за исходные данные для определения влияния антипиреновых пропиток. Из оставшегося РПМ вырезались равные элементы размерами 230x100x50 мм, которые пропитывались в различных композициях, содержащих коммерчески доступные антипиреновые добавки. Далее измерения S-параметров повторялись по описанной выше методике для каждого элемента.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На рисунке 1 ВАЦ – векторный анализатор цепей (N9917A, Keysight Technologies); КВП – коаксиально-волноводный переход (из состава калибровочного волноводного набора N9911X, Keysight Technologies); волноводная секция – прямоугольный волновод стандартного сечения (23x10 мм) (из состава калибровочного волноводного набора N9911X, Keysight Technologies).

За коэффициент отражения в данной работе принят параметр S_{11} , коэффициент поглощения рассчитывался как разность между параметрами S_{21} для пустой волноводной секции и этой же секции, содержащей РПМ:

$$\alpha = S_{21}^0 - S_{21}^i, \quad (1)$$

где S_{21}^0 – результат измерений для «пустой» волноводной секции, S_{21}^i – результат измерений для волноводной секции, содержащей образец РПМ.

Для каждой композиции измерения проводились не менее 5 раз на разных образцах (вырезанных из пропитанного РПМ). После этого проводилось усреднение полученных результатов по количеству образцов.

4. Результаты экспериментов

На рисунках 2, 3 в виде столбчатых диаграмм показаны результаты измерений, усредненные по частотному диапазону 8-12 ГГц. На рисунке 2 приведены данные по модулю коэффициента отражения, на рисунке 3 – по модулю коэффициента поглощения (1).

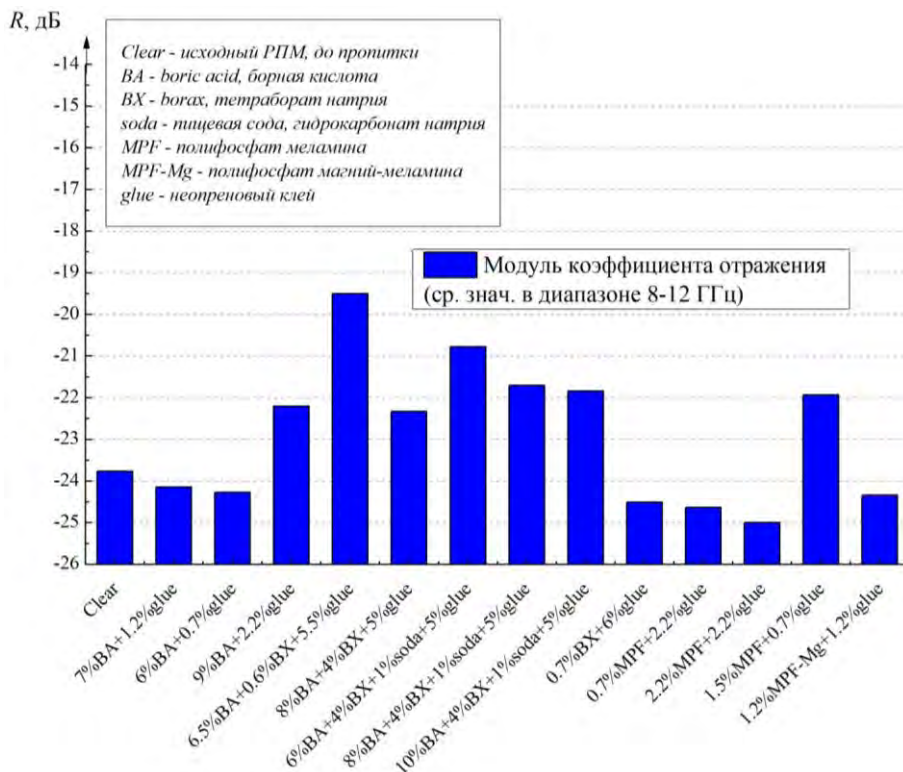


Рис. 2. Результаты измерения коэффициента отражения

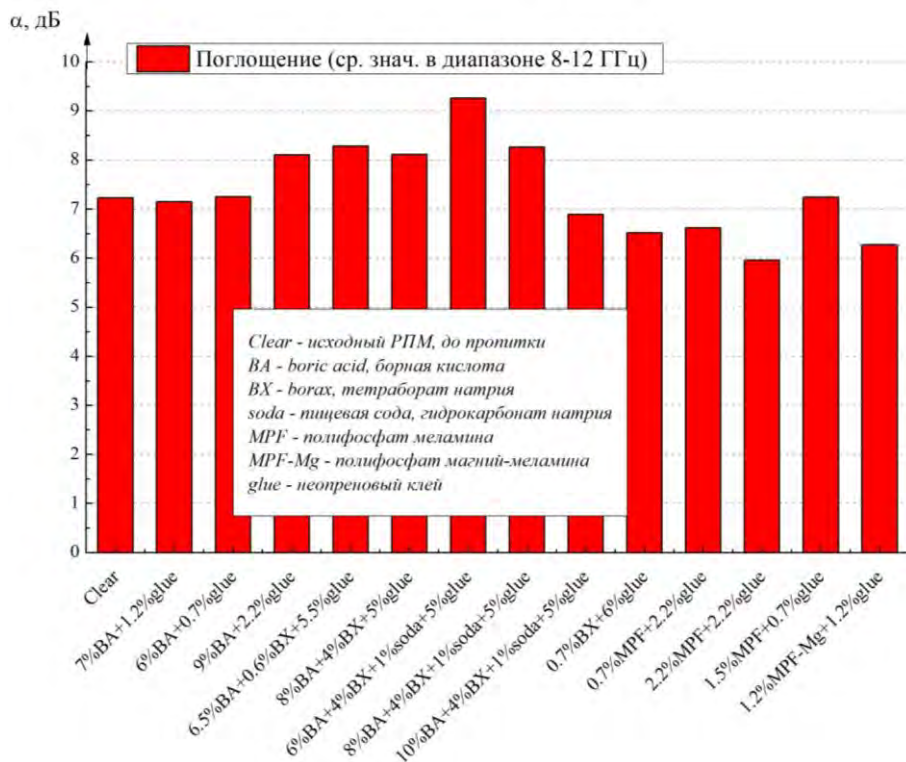


Рис. 3. Результаты измерения коэффициента поглощения

Из полученных диаграмм видно, что соединения на основе бора (борная кислота, тетраборат натрия и их сочетания) обуславливают увеличение потерь в материале РПМ (рисунок 3) по сравнению с его исходным состоянием. Кроме этого растет также и коэффициент отражения. Данные результаты позволяют сделать предположение об увеличении проводимости материала в присутствии соединений бора. Данное явление, вероятно, обусловлено типом используемых веществ – водные растворы кислот и щелочей являются электролитами. Таким образом, введение электролитов в состав материала снижает его сопротивление в исследуемом диапазоне частот, что обуславливает рост поглощения и рассогласование со свободным пространством (рост коэффициента отражения).

Введение даже незначительного количества соединений меламин, напротив, снижает оба исследуемых параметра, что говорит о снижении

проводимости материала и приближении его по своим свойствам к диэлектрикам.

4. Заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют ограничить перечень используемых веществ для изготовления антипиреновых пропиток для радиопоглощающих материалов. В частности, показано, что популярные в настоящее время соединения меламин не могут быть использованы для изготовления трудногорючих РПМ, поскольку значительно ухудшают их поглощающие свойства.

Источники финансирования и выражение признательности

В работе представлены результаты исследований, выполненных за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00227).

Список литературы

- [1] Bonsignore P. V. Flame Retardant Flexible Polyurethane Foam By Post-Treatment with Alumina Trihydrate/Latex Binder Dispersion Systems //Journal of Cellular Plastics. 1979. V. 15. No. 3. P. 163-179.
- [2] Thirumal M. et al. Halogen-free flame-retardant rigid polyurethane foams: Effect of alumina trihydrate and triphenylphosphate on the properties of polyurethane foams //Journal of applied polymer science. 2010. V. 116. No. 4. P. 2260-2268.
- [3] Ким О. П., Ким Т. Д., Саламатов Б. В. Композиция для получения огнестойкого пенополиуретана : Патент RU2014127615A. 2014.
- [4] Mack A. G., Tsao T. Mixed Glycol Polyphosphonate Compounds : Pat. US 2011/0218260. 2009.

References

- [1] Bonsignore P. V. Flame Retardant Flexible Polyurethane Foam By Post-Treatment with Alumina Trihydrate/Latex Binder Dispersion Systems //Journal of Cellular Plastics. 1979. V. 15. No. 3. P. 163-179.
- [2] Thirumal M. et al. Halogen-free flame-retardant rigid polyurethane foams: Effect of alumina trihydrate and triphenylphosphate on the properties of polyurethane foams //Journal of applied polymer science. 2010. V. 116. No. 4. P. 2260-2268.
- [3] Kim O.P., Kim T.D., Salamatov B.V. [Composition for the production of fire-resistant polyurethane foam]: Pat. RU2014127615A. 2014. (In Russian).
- [4] Mack A. G., Tsao T. Mixed Glycol Polyphosphonate Compounds : Pat. US 2011/0218260. 2009.

Acknowledgements

The paper presents the results of studies performed at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 18-79-00227).

Metamaterial-based array of SINIS bolometers

¹Yusupov R.A., ^{1,4}Sobolev A.S., ^{3,5}Gunbina A.A., ^{3,5}Mansfeld M.A.,
¹Chekushkin A.M., ^{3,5,6}Vdovin V.F., ¹Tarasov M.A., ²Edelman V.S.

¹*V.Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS
 125009, Russia, Moscow, Mokhovaya 11-7,
 yusupovrenat@hitech.cplire.ru*

²*P.Kapitza Institute for Physical Problems RAS
 117334, Russia, Moscow, Kosygina st., 2*

³*Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva
 603950, Minina 24, Nizhny Novgorod, Russia*

⁴*Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
 141701, Moscow region, Dolgoprudnyy, Institutskii lane, 9.*

⁵*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences (IAP RAS)
 603950, Nizhny Novgorod, Ulyanova, 46*

⁶*Astro Space Center of PN Lebedev Physics Institute (ASC LPI)
 117997, Moscow, Profsoyuznaya, 84/32*

Abstract: Metamaterial-based ring antennas with immersion silicon lens is developed and studied. Antennas were integrated with SINIS (Superconductor - Insulator - Normal Metal - Insulator - Superconductor) bolometers. Optical response and spectral sensitivity of such structures is measured. The optical response achieved is $2 \cdot 10^9$ V / W at 100-300 mK and a power load 2 fW-7 pW. The spectral sensitivity is measured at 240-370 GHz range. Noise-equivalent temperature difference (NETD) is $100 \mu\text{K} / \text{Hz}^{1/2}$ at the background level 2.7K. This result allows to measure anisotropy of the CMB.

Keywords: metamaterial, bolometers, planar antenna, antenna array, CMB, blackbody, spectral response.

Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами

¹Юсупов Р.А., ^{1,4}Соболев А.С., ^{3,5}Гунбина А.А., ^{3,5}Мансфельд М.А.,
¹Чекушкин А.М., ^{3,4,5}Вдовин В.Ф., ¹Тарасов М.А., ²Эдельман В.С.

¹*Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
 125009, Россия, Москва, Моховая улица, д.11, к.7
 yusupovrenat@hitech.cplire.ru*

²*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН
 117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2*

³Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, ул. Минина, д.24, Нижний Новгород, Россия

⁴Московский физико-технический институт (государственный университет)

⁵Институт прикладной физики РАН
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

⁶Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

Аннотация: Разработан и исследован метаматериал в виде матрицы кольцевых антенн, сопряженный с иммерсионной кремниевой линзой. В эксперименте были измерены оптический и спектральный отклик созданной структуры метаматериалов с интегрированными в неё болометрами на основе СИНИС структуры. При температурах образца 100 - 300 мК и мощности теплового излучения 2 фВт – 7 пВт измерен отклик на внешнее излучение, достигающий $2 \cdot 10^9$ В/Вт. Измерена спектральная чувствительность в диапазоне 240 - 370 ГГц. Эквивалентная шуму разница температур (флуктуационная чувствительность) при уровне фона 2.7 К составляет $100 \text{ мК/Гц}^{1/2}$, что позволяет измерять анизотропию реликтового излучения.

Ключевые слова: метаматериал, болометры, планарная антенна, матрица антенн, реликтовое излучение, черное тело, спектральный отклик.

1. Введение

В настоящее время для различных радиоастрономических задач, в частности, для проектов, направленных на исследование реликтового излучения Вселенной, необходимы приемные системы субтерагерцового диапазона частот с противоречивой комбинацией требований: предельно высокая чувствительность, наряду с широким динамическим диапазоном, работоспособные при высокой фоновой мощности [1]. Данным критериям удовлетворяют матрицы приемных элементов. При согласовании матрицы планарных антенн с внешним излучением можно применять два подхода: матрица планарных антенн размером порядка половины длины волны каждая, либо существенно меньшие антенны в конфигурации метаматериала или распределенного абсорбера. В последнем случае удастся сделать матрицу более широкополосной и компактной, что позволяет поместить её на выходе одномодового рупора, либо в фокусе квазиэллиптической иммерсионной линзы. В качестве чувствительных элементов использованы болометры структуры Сверхпроводник – Изолятор – Нормальный металл – Изолятор – Сверхпроводник (СИНИС). Разработаны и изготовлены такие метаматериалы для диапазона 350 ГГц и испытаны с сапфировой линзой.

2. Матрица метаматериалов

Метаматериал в виде периодической матрицы проводящих элементов может эффективно взаимодействовать с электромагнитным излучением, когда размеры элементов и их период существенно меньше длины волны. Классическим примером таких структур является разрезанный кольцевой резонатор[2]. Для таких структур нет ограничения на минимальный размер порядка половины длины волны как в случае замкнутых кольцевых резонаторов. Качественно такой эффект аналогичен влиянию «укорачивающей» емкости для дипольной антенны. Объединяя такие элементы в плотную периодическую матрицу с сильным взаимодействием между элементами, удастся получить более эффективное взаимодействие с излучением. Ранее мы исследовали матрицы 5x5 стандартных кольцевых антенн диапазона 350 ГГц с внешним диаметром антенны 300 мкм, периодом 475 мкм, занимающие площадь 2200x2200 мкм [3-5]. В образцах типа метаматериала внешний диаметр колечка составлял 60 мкм, период 70 мкм, площадь матрицы 9x9 элементов составляет 621x621 мкм. В каждую планарную антенну (как для стандартного варианта, так и для метаматериалов) помещены два болометра на основе СИНИС структуры. Таким образом, на площади 0.38 мм² расположено 162 болометра, а на 4.8 мм² расположено 50 болометров, т.е. при одинаковой мощности насыщения на один болометр для матрицы метаматериалов допустимая мощность на единицу площади будет в 41 раз больше. При этом пиксели матрицы изображения можно располагать существенно ближе друг к другу.

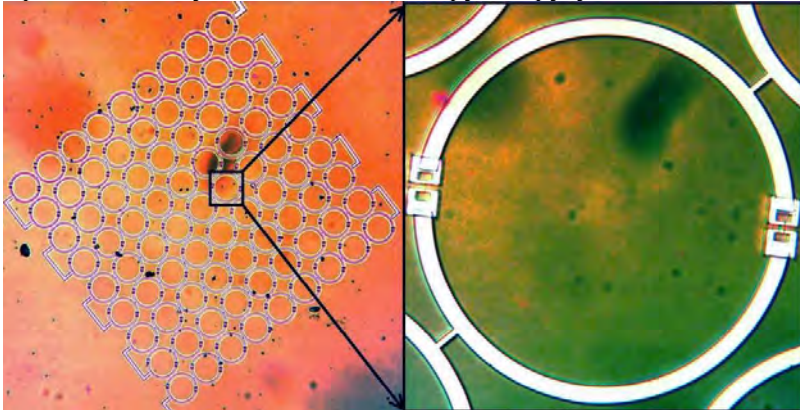


Рис. 1. Изображение матрицы изготовленных метаматериалов полученное в оптическом микроскопе.

Fig. 1. Metamaterial-based antennas matrix in an optical microscope

3. Эксперимент

Измерения тестовых образцов проводили в криостате при рабочей температуре 100 и 300 мК. Проводили два типа измерений: исследовали оптический отклик приемной структуры на различную температуру черного тела (ЧТ) и спектральный отклик.

Исследуемые образцы в держателе с кремниевой линзой исследовали в сорбционном криостате на гелии-3 при температуре 280 мК, а также в криостате растворения при температурах 100-300 мК. ЧТ, в виде напыленной пленки нихрома на кремниевой подложке (в поздних вариантах на подложке сапфира), расположено внутри криостата. Изменяя температуру ЧТ при помощи нагревателя от 2 до 7 К, измеряли отклик по напряжению на частоте 345 ГГц (оптический отклик). Мощность приходящая на структуру с учетом распределения Планка составила от 2 фВт-7 пВт. Измеренные кривые отклика приведены на рисунке 2. Полезную информацию о флуктуационной чувствительности можно получить из зависимости отклика от температуры излучателя. В нашем случае мы получаем $dV(T=2.7K)/dT = 135$ мкВ/К. При шуме на выходе $10 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ эквивалентная шуму разность температур составит $100 \text{ мК/Гц}^{1/2}$. Если подавить паразитный фоновый сигнал и снизить электронную температуру до 0.1 К, то можно улучшить чувствительность еще на порядок.

При измерении спектрального отклика в качестве источника использовали лампу обратной волны (ЛОВ). Сигнал от ЛОВ, проходя через окна криостата, поступает на исследуемый образец. Измеренные спектральные отклики системы представлены на рисунке 3. Видно, что спектральный отклик метаматериала более широкий и более равномерный по сравнению с матрицей стандартных кольцевых антенн, а повторяющиеся на обеих кривых неоднородности соответствуют потерям в квазиоптическом тракте, включающем окна и фильтры на трех температурных ступенях криостата. На первой ступени располагалась ограничивающая медная апертура с диаметром отверстия 4 мм, ФНЧ ИК диапазона ZITEX G108 и нейтральный ослабитель в виде тонкой пленки нихрома на каптоновой основе с ослаблением 10 дБ. На второй ступени располагалась комбинация следующих фильтров: ФНЧ ИК диапазона FLUOROGOLD, медная апертура с диаметром отверстия 4 мм, нейтральный ослабитель 10 дБ, ФНЧ ИК диапазона ZITEX G108, еще один нейтральный ослабитель 10 дБ. На ступени 300 мК располагался собственно встречный рупор с ФНЧ 600 ГГц на входе.

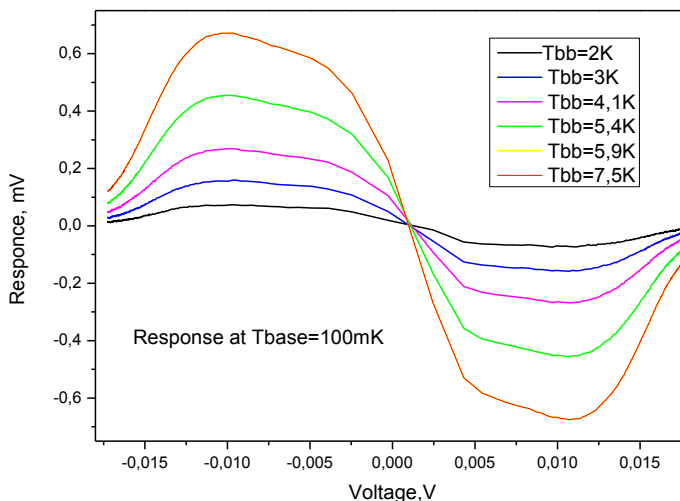


Рис. 2. Экспериментальные результаты: Отклик по напряжению на излучение черного тела при температурах от 2 К до 7.5 К.

Fig.2. Voltage response to blackbody radiation at temperatures from 2 K to 7.5 K.

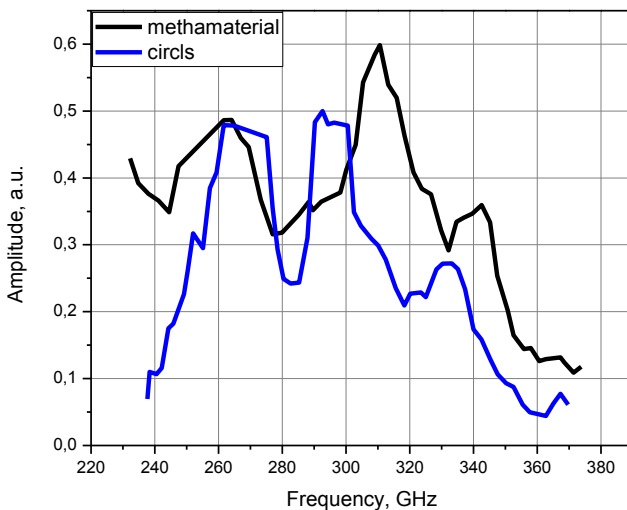


Рис. 3. Спектральный отклик структуры с метаматериалами (черная кривая) и стандартных образцов с размерами антенны порядка длины волны (синяя кривая).

Fig. 3. The spectral responses: metamaterial-based structure (black curve) and standard sample with half-wave ring antennas (blue curve)

4. Заключение

Разработаны, изготовлены и измерены матрицы болометров в конфигурации метаматериалов. Измерен отклик по напряжению на частоте 345 ГГц и спектральный отклик в диапазоне 240 – 370 ГГц. Экспериментально получена вольтваттная чувствительность $2 \cdot 10^9$ В/Вт, флуктационная чувствительность $100 \text{ мК/Гц}^{1/2}$, полоса пропускания более 100 ГГц.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 32 «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологии». Проект "ПРИЗ".

Список литературы

- [1] Nati F., Ade P., Boscaleri A., et al., The OLIMPO experiment // *New Astronomy Reviews*. 2007. Т. 51. С. 385-389, Doi:10.1016/j.newar.2006.11.066.
- [2] Marques R., Mesa F., Martel J., F. Medina J. Comparative analysis of edge- and broadside- coupled split ring resonators for metamaterial design - theory and experiments // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2003. Т. 51, № 10. DOI:10.1109/TAP.2003.817562
- [3] Mahashabde S., Sobolev A., Bengtsson A., et al, A frequency selective surface based focal plane receiver for the OLIMPO balloon-borne telescope // *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy*. 2015. Т. 5. №1. С. 145-152. doi: 10.1109/TTHZ.2014.2362010.
- [4] Mahashabde S., Sobolev A., Tarasov M., Tsydynzhapov G., Kuzmin L., Planar frequency selective bolometric array at 350 GHz // *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy*. 2015. Т. 5. № 1. С. 37-43. doi: 10.1109/TTHZ.2014.2377247.
- [5] Mahashabde S., Tarasov M., Salatino M., et al., A distributed-absorber cold-electron bo-lometer single pixel at 95 GHz // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Т. 107. 092602. doi: 10.1063/1.4929604.

References

- [1] Nati F., Ade P., Boscaleri A., et al., The OLIMPO experiment, *New Astronomy Reviews* 51 (2007) 385-389, doi:10.1016/j.newar.2006.11.066.
- [2] R. Marques, F. Mesa, J. Martel, F. Medina, Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design - theory and experiments, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume: 51, Issue: 10, 2003, DOI:10.1109/TAP.2003.817562
- [3] Mahashabde S., Sobolev A., Bengtsson A., et al, A frequency selective surface based fo-cal plane receiver for the OLIMPO balloon-borne telescope, *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy*, vol. 5, No 1, 2015, pp. 145-152, doi: 10.1109/TTHZ.2014.2362010.
- [4] Mahashabde S., Sobolev A., Tarasov M., Tsydynzhapov G., Kuzmin L., Planar frequency selective bolometric array at 350 GHz, *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy*, vol. 5, No 1, 2015, pp. 37-43, doi: 10.1109/TTHZ.2014.2377247.
- [5] Mahashabde S., Tarasov M., Salatino M., et al., A distributed-absorber cold-electron bo-lometer single pixel at 95 GHz, *Appl. Phys. Lett.*, 107, 092602 (2015), doi:10.1063/1.4929604.

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Academy of Sciences, Basic Research Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 32 "Nanostructures: Physics, Chemistry, Biology, Technology Basics", project "PRIZE".

Janus-like nanoparticles as active elements of wideband radar-absorbing systems

Nikolay A. Torkhov^{1,2,3}, Andrey V. Nomoev⁴, Vadim A. Novikov², N.V. Yumozhapova⁵

¹*Scientific- Research Institute of Semiconductors
Tomsk, 634034, Russian Federation*

²*Tomsk State University Tomsk, 634050, Russian Federation, trkf@mail.ru*

³*Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
Tomsk, 634050, Russian Federation*

⁴*Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the RAS,
Ulan-Ude, 670047, Russian Federation*

⁵*Buryat State University, Ulan-Ude, 670000, Russian Federation*

Abstract: *The unique physical properties of Janus-like nanoparticles can be used to increase the effectiveness of radar-absorbing coatings at a wider frequency range of electromagnetic waves, as well as to develop high-sensitivity video surveillance and spectral analysis systems on the base of new principles of operation.*

Keywords: *Janus-like nanoparticles, silicon, tantalum disilicide, radar absorption, microwave imaging.*

Янус-подобные наночастицы как активные элементы широкополосных радиопоглощающих систем

^{1,2,3}Торхов Н.А., ⁴Номоев А.В., ²Новиков В.А., ⁵Юмोजапова Н.В.

¹*АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»
г. Томск, 634034, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский Государственный университет
г. Томск, 634050, Россия, trkf@mail.ru*

³*Томский университет систем управления и радиоэлектроники
г. Томск, 634050, Россия*

⁴*Институт физического материаловедения СО РАН
г. Улан-Удэ, 670047, Россия*

⁵*Бурятский государственный университет, Россия,
г. Улан-Удэ, 670000, Россия*

Аннотация: Уникальные физические свойства янус-подобных наночастиц могут быть использованы для повышения эффективности радиопоглощающих покрытий в более широком диапазоне частот электромагнитных волн, а также для разработки высокочувствительных систем видеонаблюдения и спектрального анализа на основе новых принципов работы.

Ключевые слова: янус-подобные наночастицы, кремний, дисилицид тантала, радиопоглощение, радиовидение.

1. Введение

Актуальность развития широкополосных радиопоглощающих покрытий определяется тем, что они позволяют значительно улучшить характеристики существующих систем радиоэлектронной защиты, а также дают возможность разрабатывать системы видеонаблюдения и спектрального анализа с улучшенными характеристиками на основе новых принципов функционирования.

Современные технологии изготовления таких покрытий основаны на радиопоглощающих свойствах композитных материалов представляющих собой полимерное основание или матрицу, содержащую нанодисперсные наполнители с размером частиц не превышающими как правило сотен нанометров: Al, TiO_2 , ZrO_2 , Fe_2O_3 , Fe_3C , $\alpha\text{-Si:H}$, $\alpha\text{-C:H}$ [1, 2] и др. Используемые технологии имеют ряд ограничений по частотному диапазону, эффективности поглощения электромагнитной энергии и спектральной чувствительности, что, по всей вероятности, объясняется ограниченными электрофизическими возможностями используемых наночастиц.

В отличие от описанных выше янус-подобные наночастицы, например, $\text{Ta}_2\text{Si/Si}$ (рис. 1) обладают дополнительными степенями свободы, обусловленными электрическим (или магнитным) моментом, внутренней переменной емкостью, что позволяет преодолеть большинство из существующих технических ограничений.

2. Экспериментальная часть

Образование из Ta и Si термодинамически равновесных янус-подобных наночастиц размерами от единиц до сотен нанометров происходит через образование жидких капель с различной стехиометрией и соотношением фазовых компонентов с последующей их кристаллизацией. В соответствии с диаграммой состояния Ta-Si могут реализоваться следующие фазовые составы янус-подобных наночастиц $\text{TaSi}_2\text{/Si}$: 1 – доэвтекти-

ческий состав, характеризующийся большим содержанием TaSi_2 (рис. 1, I, *a*); 2 – эвтектический состав, характеризующийся небольшим содержанием фазы TaSi_2 (рис. 1, I, *б*) и 3 – заэвтектический состав, характеризующийся практически полным отсутствием фазы TaSi_2 (рис. 1, I, *в*).

Структура полученных янус-подобных наночастиц исследовалась методами, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), рентгенофазового анализа (РФА) и электронной дифракцией на отдельных участках (SAED) [3, 4]. Полученные на ПЭМ изображения этих наночастиц (рис. 1, II) показывают, что они имеют близкую к сферической форму и состоят из двух частей. Темный контраст на изображении – соответствует фазе дисилицида тантала TaSi_2 , а более светлый – фазе кремния (рис. 1, II, *a, б, в*).

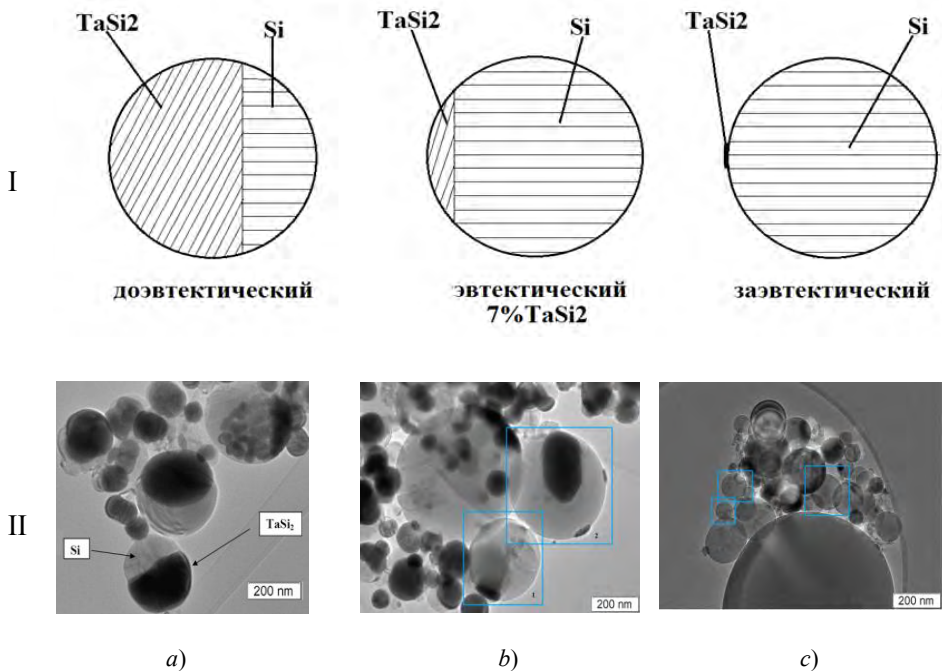


Рис. 1. I. Строение янус-подобной наночастицы TaSi_2 : доэвтектического – *a*) эвтектического – *б*) и заэвтектического – *в*) фазовых составов. II. Их ПЭМ-изображения.

Fig. 1. I. TaSi_2 Janus-like nanoparticle structure of the hypoeutectic – *a*), eutectic – *б*) and hypereutectic – *в*) phase compositions. II. Their TEM images.

Взаимодействие между фазами TaSi_2 и Si в таких частицах осуществляется Ван-дер-Ваальсовыми силами притяжения, обеспечивающи-

ми прочную механическую связь между ними. Согласно данным рентгеноструктурного анализа расстояние между областью с фазой TaSi_2 и областью с фазой Si намного меньше, чем при газотермическом напылении или иным способом получения композитов, что обеспечивает плотный электрический контакт между ними.

В процессе исследования электростатической системы янус-подобных наночастиц эвтектического состава методом зонда Кельвина атомно-силовой микроскопии (АСМ) удалось измерить разность потенциалов на границе раздела двух фаз $\Delta\phi < 60$ мВ (рис. 2, I). Напомним, что дисилицид тантала TaSi_2 (работа выхода $\Phi(\text{TaSi}_2) \approx 4.46$ эВ) обладает металлической проводимостью и активно используется для получения низкоомных сплавных омических контактов к высоколегированному n^+ -Si кремнию электронного типа проводимости. В данном случае фаза TaSi_2 образует плотный электрический контакт к нелегированному кремнию i -Si (электронное сродство $\chi(\text{Si}) = 4.03$ эВ, работа выхода $\Phi(\text{Si}) \approx 4.61$ эВ, $\Phi(\text{TaSi}_2) < \Phi(\text{Si})$), что может привести к образованию на интерфейсе небольшого потенциального барьера ϕ_b (рис. 2, II, а). Наличие барьера на границе между металлом и полупроводником будет способствовать формированию на интерфейсе TaSi_2/Si области объемного заряда (ОПЗ) протяженностью W , что может привести к появлению у такой частицы электрической емкости и электрического дипольного момента. Проведенная методами АСМ оценка слоя Томаса-Ферми $W_{\text{TF}} \approx 10$ нм указывает на наличие у исследуемой частицы в ОПЗ сильного электрического поля E_w с W_s по размерам полностью заполняющей кремниевую половину наночастицы. Согласно [5, 6], для микронных и нано-контактов поле E_w может эффективно усиливаться электрическим полем периферии $E_t = E_{\text{grad}} + E^*$ ($E^* < 2 \times 10^6$ В/м, $E_{\text{grad}} = \text{Const}$).

Таким образом, наличие дипольного момента и внутренней емкости ведет к появлению у янус-подобной частицы TaSi_2 дополнительных степеней свободы, которые можно использовать для повышения эффективности взаимодействия частицы с внешними электрическими и переменными магнитными полями.

Исследование проводимости янус-подобных TaSi_2 -Si частиц АСМ-методом сопротивления тока растекания (Iрг-метод) показало наличие у них нелинейных вольтамперных характеристик (ВАХ) (рис. 2, II, б). Линеинный участок на записанной в полулогарифмическом масштабе прямой ветви ВАХ подтверждает наличие в области интерфейса потенциального

БШ. Метод ВАХ позволил провести для контакта диаметром $D=200$ нм оценки его высоты $\phi_b \approx 0.44$ эВ.

Большие значения показателя идеальности n вызваны, по всей вероятности, наноразмерами контакта и сильным влиянием электрического поля периферии E_i , о чем свидетельствует наличие протяженной “мертвой” области $\phi_b < \Delta U \approx 0.60$ В на начальном участке прямой ВАХ [5]. В [6] сообщалось, что встроенное электрическое поле периферии способствует существенному (на несколько порядков) увеличению токовой β_I и β_U вольтовой фоточувствительностей контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки. Наличие таких электростатических полей у янус-подобных наночастиц, возможно, делает перспективным их использование также и в качестве высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей.

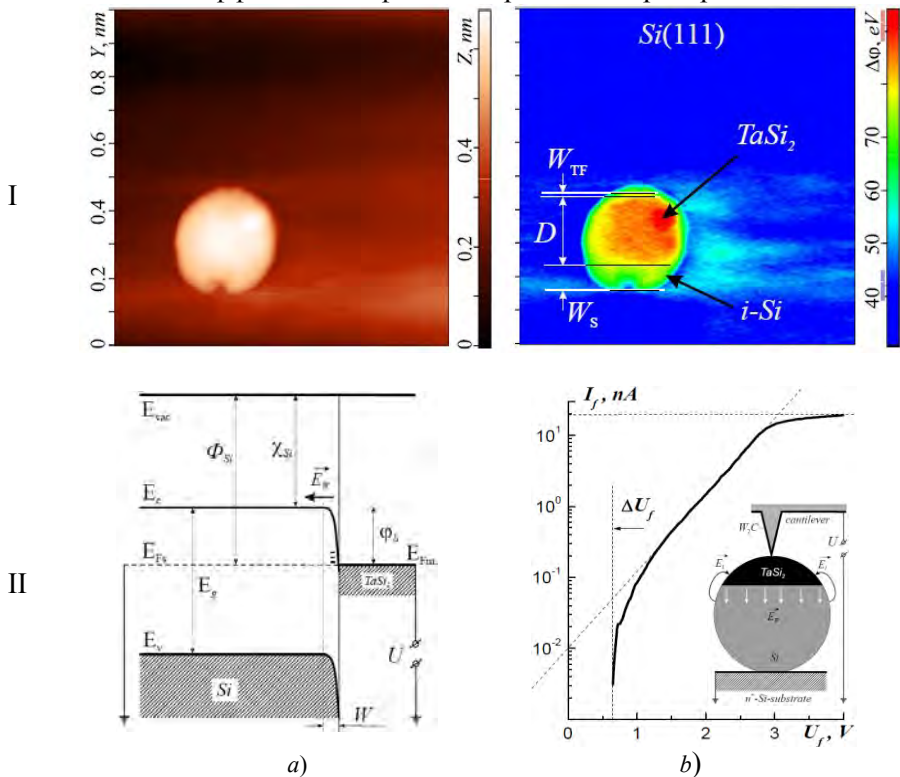


Рис. 2. I. АСМ-изображение рельефа TaSi₂-Si – наночастицы – а) и её КПП – б).

II. Энергетическая диаграмма TaSi₂-Si – наночастицы – а) и её ВАХ – б).

Fig. 2. I. TaSi₂-Si nanoparticle relief AFM image – а) and its CPD – б).

II. TaSi₂-Si nanoparticle energy diagram – а) and its I-V curve – б).

Наличие дополнительных степеней свободы позволяет использовать янус-подобные наночастицы в качестве активных элементов широкополосных радиопоглощающих систем. Так, например, изменяя величину электрического E (или магнитного B) поля в субмикронной радиопоглощающей ячейке содержащей такую наночастицу (рис. 3, *a*), можно управлять ее импедансом, а также резонансной частотой механических и электрических колебаний в более широком (до ТГц) частотном диапазоне. В качестве основы для таких ячеек могут быть использованы, например, высокоорганизованные наноструктурированные матрицы Al_2O_3 размером пор до 400 нм, длиной каналов от десятков нм до сотен мкм и плотностью заполнения 10^8 – 10^{11} см $^{-2}$ (рис. 3, *b*). Структурные параметры пор Al_2O_3 (диаметр, длина, расстояние между порами) могут контролироваться режимами анодирования [7].

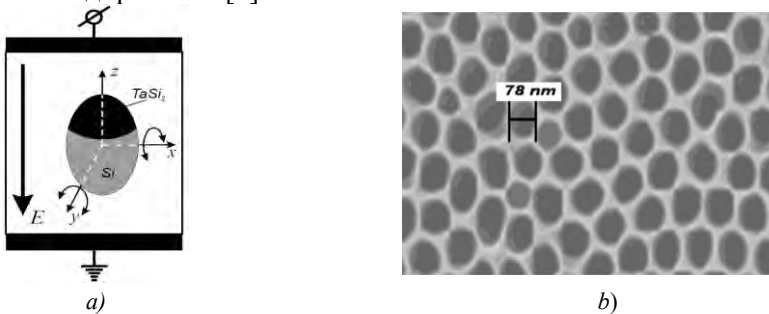


Рис. 3. Конструкция радиопоглощающей ячейки на основе янус-подобной TaSi_2 -Si наночастицы – *a*) и электронно-микроскопическое изображение Al_2O_3 – наноячеек – *b*) [6].

Fig. 3. A structure of the radar-absorbent mesh based on Janus-like TaSi_2 -Si nanoparticle – *a*) and electron microscopical image of Al_2O_3 nanomeshes – *b*) [7].

3. Заключение

Наличие у янус-подобных наночастиц дополнительных степеней свободы, обусловленных дипольным моментом и внутренней емкостью делают возможным повысить эффективность радиопоглощающих покрытий в более широком частотном диапазоне. Использование таких наночастиц в качестве активных элементов радиопоглощающих наноячеек открывает потенциальные возможности для разработки высокочувствительных систем радионаблюдения и спектрального анализа на основе новых принципов функционирования. Наличие у таких частиц сильных периферийных электрических полей делает возможным их использование в качестве высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей.

Список литературы (References)

- [1] Petrov V. V., Nikolaychuk G. A., Yakovlev S. V., Lutsev L. V. Multipurpose Radar-Absorbent Materials Based on Magnetic Nanostructures: Deriving, Properties and Application // *Komponenty i Tekhnologii*. 2008. Vol. 10, pp. 60–63.
- [2] Golovataya S. V., Kovalchuk N. V., Kolbun N. V., Poznyak A. A. The Influence of the Strong Electrolyte on Properties of Two-Layer Flexible Radar-Absorbent Shields with Gel-Powder Fillers. 19-rd International Crimean Conference. Microwave & Telecommunication Technology “CriMiCo-2009”. Conference Proceedings September 14—18. 2009. 589-590. Sevastopol, Crimea, Ukraine. www.crimico.com.
- [3] Nomoev A.V. , Bardakhanov S.P., Schreiber M., Bazarova D. Zh., Baldanov B.B., Romanov N.A. Synthesis, Characterization and Mechanism of Formation of Janus-Like Nanoparticles of Tantalum Silicide-Silicon (TaSi_2/Si) // *Nanomaterials*, (2015), V. 5, pp. 26-35.
- [4] Nomoev A.V., Radnaev A.R., Baldanov B.B., Torhov N.A., Radnaev B.R., Romanov N.A., Schreiber M. Thermodynamic considerations in the formation of Janus-like TaSi_2/Si nanoparticles by electron-beam evaporation // *Chemical Physics Letters*, (2015), V.637, pp. 94-96.
- [5] Torkhov N.A. Nature of forward and reverse saturation currents in metal-semiconductor contacts with the Schottky barrier. *Semiconductors*. 2010. V. 44. No 6. pp. 737-744.
- [6] Torkhov N.A. The influence of periphery electrostatic field upon the photovoltaic effect in metal–semiconductor contacts with Schottky barrier. *Fizika i Tehnika Poluprovodnikov*. 2018. V. 52. No 10. pp. 1150 – 1171.
- [7] Shimanovich D. L. Building of Membrane Structures Based on Poromeric Al_2O_3 with Highly-Ordered Nanosized Morphology for Filtering Systems. 24-rd International Crimean Conference. Microwave & Telecommunication Technology Conference. “CriMiCo-2014”. Proceedings September 7—13, 2014. 736-737. Sevastopol, Crimea, Russia. www.crimico.com. ISBN: 978-966-335-412-5. IEEE Каранор 736 №: CFP14788.

The periphery electric fields of the planar silicon p-n junctions

^{1,2,3}Torkhov N.A., ²Novikov V.A.

¹Scientific- Research Institute of Semiconductors
Tomsk, 634034, Russian Federation

²Tomsk State University Tomsk, 634050, Russian Federation, trkf@mail.ru

³Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract: The design of the diffusion planar p-n junction is such that around its periphery there is an electrostatic field of the periphery E^* . This field is dependent on the density of the displacement vector flow through the side surface of the space charge region. The electric field E^* leads to that electrostatic potential of surface of p^+ -contact (in contrast to Schottky contact) always exceed electrostatic potential of surface of surrounding its semiconductor surface of n-type. The direct dependence of the modulus of E^* with the area of the contact lead to the increase in the electrostatic potential of the p^+ -contact surface with increasing its diameter.

Keywords: silicon, p-n-junction, electrostatic potential of the surface, electric field of the periphery.

Электрические поля периферии плоских кремниевых p-n переходов

^{1,2,3}Торхов Н.А., ²Новиков В.А.

¹АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»
г. Томск, 634034, Россия

²Национальный исследовательский Томский Государственный университет
г. Томск, 634050, Россия, trkf@mail.ru

³Томский университет систем управления и радиоэлектроники
г. Томск, 634050, Россия

Аннотация: Конструкция плоского диффузионного p-n –перехода такова, что вокруг его периферии присутствует определяемая плотностью потока вектора смещения через боковую поверхность области пространственного заряда электростатическое поле периферии E^* . Наличие такого электрического поля в плоском кремниевом p-n –переходе приводит к тому, что, в отличии от электростатического потенциала поверхности металлических контактов Шоттки, элек-

тростатический потенциал поверхности p^+ -контакта всегда превышает электростатический потенциал окружающей его полупроводниковой поверхности n -типа проводимости. Прямая зависимость модуля E^* от площади выпрямляющего контакта является причиной увеличения электростатического потенциала поверхности p^+ -контакта при увеличении его диаметра.

Ключевые слова: кремний, p - n –переход, электростатический потенциал поверхности, электрическое поле периферии.

1. Введение

Вокруг плоских контактов металл-полупроводник (М-П) с барьером Шоттки (БШ) существуют электростатические поля, обусловленные разницей электростатических потенциалов металлических и полупроводниковых поверхностей E_{grad} , а также потоком вектора смещения электрического поля через боковую поверхность области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника E^* . Наличие таких полей приводит к зависимости электростатического потенциала поверхности выпрямляющего контакта от его линейных размеров, что отражается на его статических, СВЧ и фотovoltaических характеристиках [1 – 3].

Поверхностные электростатические потенциалы (работы выхода электронов) полупроводников n - и p - типов проводимости также имеют разные значения. Это дает основание полагать, что и вокруг периферии плоских p - n –переходов должны существовать аналогичные электростатические поля, существование которых и было подтверждено в работе экспериментально. Описаны особенности их поведения в зависимости от латеральных размеров плоских p - n –переходов.

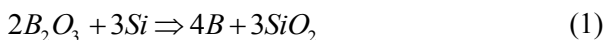
2. Методическая часть

Изготовление плоских p - n –переходов (далее просто – p - n –переходов) осуществлялось диффузией бора В из твердого планарного источника нитрида бора BN в n -слой кремниевой n - n^+ -Si(111) сэндвич-структуры через круглые окна в диэлектрические маски термического окисла SiO_2 диаметрами D : 5 мкм, 15 мкм, 30 мкм, 50 мкм, 100 мкм, 200 мкм и 500 мкм. Для получения однородных p - n –переходов использовался так называемый двухстадийный процесс диффузии [4].

На первой стадии на поверхности Si в потоке газовой смеси с избытком сухого кислорода в результате взаимодействия трехоксида бора с образующейся на поверхности пластины двуокисью кремния при температуре $T=1100^\circ\text{C}$ в течении $t=10$ минут формировали однородный слой бороси-

ликтного стекла (БСС). Вследствие избытка кислорода равновесие этой реакции было смещено в сторону уменьшения концентрации бора на границе с кремнием, что и предотвращало его диффузию в кремний.

На второй стадии, не вынимая пластины из рабочей зоны диффузионной печи, в течении 15 минут проводили её отжиг в нейтральной среде при той же температуре в результате чего запускался процесс диффузии бора в кремний. Свободный бор В высвобождался результате химической реакции (1) происходящей на интерфейсе БСС/Si. Диффузия бора В при такой температуре сопровождается активацией его электрической активности как акцептора в результате чего в приповерхностной области кремния формировался слой дырочного p^+ -типа проводимости толщиной ~ 1 мкм.



После окончания процесса диффузии проводили “раскисление” остатков БСС в атмосфере кислорода и его химическое удаление. В результате этого поверхность кремния в окнах SiO_2 опускалась приблизительно на 80 нм от исходного уровня, что после удаления SiO_2 проявлялось в виде отрицательной ступеньки. Сформированные таким образом p - n –переходы имели стандартные вольт-амперные характеристики (ВАХ) с $n \approx 1.47$ и $\phi_{bm} \approx 1.12$ эВ.

После этого со всей поверхности кремния удалялась маска SiO_2 и проводились измерения электростатического потенциала поверхности (далее – потенциал поверхности) кремния методом зонда Кельвина атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для проведения измерений использовался кантилевер с проводящим покрытием из карбида вольфрама WC с работой выхода ≈ 4.9 эВ. Сущность метода зонда Кельвина АСМ подробно описана в [5] и заключается в измерении контактной разности потенциалов ($KRP \equiv \Delta\phi$) между поверхностным потенциалом исследуемой поверхности и иглой кантилевера.

3. Результаты экспериментов

Результаты АСМ-измерений позволили выявить основные особенности в поведении поверхностного потенциала изготовленных плоских кремниевых p - n –переходов от диаметров их p^+ –контактов.

Прежде всего стоит отметить превышение электростатического потенциала поверхности p^+ -Si контакта над электростатическим потенциалом окружающей его n -Si поверхности (рис. 1, а).

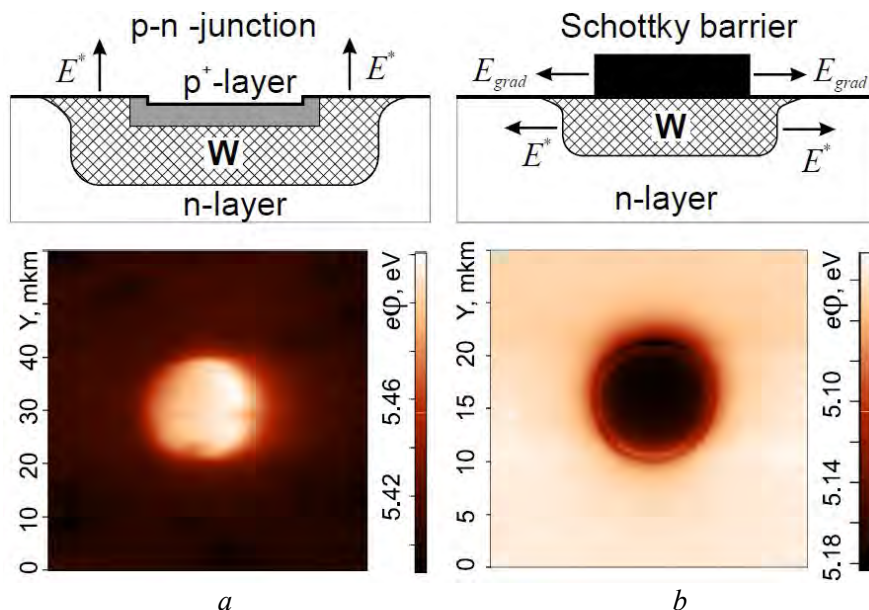


Рис. 1. Поверхностный потенциал p-n –перехода (конструктивная схема «p-n –junction») – а) и контакта М-П с БШ [6] (конструктивная схема «Schot. barrier») – б).

Fig. 1. Surface potential of p-n junction (structural scheme ‘p-n junction’) – a) and metal-semiconductor Schottky barrier contact [6] (structural scheme ‘Schot. barrier’) – b).

Напомним, что значение электростатического потенциала плоских металлических контактов Шоттки практически всегда меньше значений электростатического потенциала окружающей их поверхности большинства известных полупроводников как n- [1], так и p- типов проводимостей [2]. При этом, увеличение диаметра металлического контакта Шоттки на полупроводнике n-типа проводимости во всех случаях приводит к уменьшению среднего значения его электростатического потенциала от значения электростатического потенциала полупроводниковой поверхности до значения поверхностного потенциала сплошной металлической пленки. Для плоских контактов Шоттки на полупроводнике p-типа проводимости увеличение диаметра металлического контакта приводит наоборот к увеличению значения его электростатического потенциала от значения электростатического потенциала сплошной металлической пленки до значений электростатического потенциала окружающей его полупроводниковой поверхности [2]. То есть, ни в одном из вышеперечисленных случаев электростатический потенциал поверхности металлических контактов Шоттки

не превышал электростатических потенциал окружающей его полупроводниковой поверхности. С р-п –переходами ситуация иная – электростатический потенциал p^+ –контакта в проводимых экспериментах всегда превышал электростатический потенциал окружающей его полупроводниковой поверхности.

Другим необычным фактом является то, что увеличение диаметра плоского р-п-перехода приводит не к уменьшению, как в случае с контактами Шоттки (рис. 2, *a*), а наоборот к увеличению потенциала поверхности p^+ -контакта (рис. 2, *b*).

Столь необычное поведение электростатических потенциалов поверхностей плоских p^+ -контактов можно объяснить, воспользовавшись физической моделью электростатических полей периферии планарных плоских контактов М-П с БШ. Согласно этой модели, вокруг плоских контактов М-П с БШ существует электростатическое поле периферии E_l (2) образованное суперпозицией составляющих электрических полей E_{grad} и E^* (рис. 1, *b*) [1 – 3].

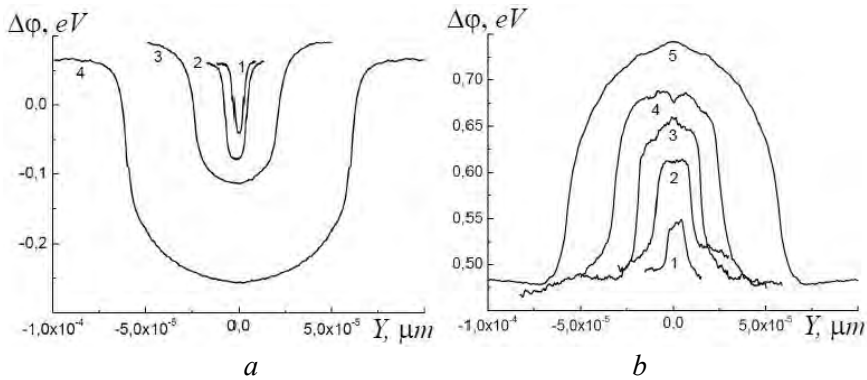


Рис. 2. Профили поперечных сечений КРП: *a*) – контактов М-П с БШ [6] (диаметрами D : 1 – 5 мкм, 2 – 40 мкм, 3 – 40 мкм и 4 – 100 мкм) и *b*) – р-п –переходов (диаметрами D : 1 – 5 мкм, 2 – 15 мкм, 3 – 30 мкм, 4 – 50 мкм и 5 – 100 мкм).

Fig. 2. Profiles of CPD cross sections for: *a*) – the metal-semiconductor Schottky barrier contacts [6] (with diameter D of: 1 – 5 μm , 2 – 40 μm , 3 – 40 μm , and 4 – 100 μm); and *b*) – the p-n junctions (with diameter D of: 1 – 5 μm , 2 – 15 μm , 3 – 30 μm , 4 – 50 μm , and 5 – 100 μm).

$$E_l = E_{grad} + E^* \quad (2)$$

Согласно [3], составляющая E_{grad} для заданной контактной системы постоянна и определяется разностью электростатических потенциалов полупроводниковой поверхности и металлического контакта. В АСМ-методе зонда Кельвина значение E_{grad} напрямую измерить невозможно по причине того, что оно не входит в электрический контур измерительной схемы

АСМ и, согласно условиям термодинамического равновесия, не принимает участия в механизмах обмена неравновесными заряженными частицами между измеряемой поверхностью и иглой кантилевера.

Модуль составляющей E^* определяется плотностью потока вектора смещения через боковую поверхность ОПЗ W и поэтому имеет прямую зависимость от диаметра контакта. Кроме этого поле E^* входит в электрический контур измерительной схемы атомно-силового микроскопа и поэтому может быть непосредственно измерена в АСМ-методе зонда Кельвина [3].

Конструкция плоского диффузионного р-п –перехода такова, что в нем отсутствует составляющая электрического поля периферии E_{grad} (рис. 1, *a*, «р-п –junction») в отличие от контакта М-П с БШ (рис. 1, *b*, «Schottky barrier»). Это приводит к тому, что электростатический потенциал поверхности p^+ –контакта превышает электростатический потенциал окружающей его полупроводниковой поверхности n-Si. Прямая зависимость значений E^* от диаметра выпрямляющего контакта является причиной увеличения электростатического потенциала поверхности p^+ -контакта при увеличении диаметра р-п –перехода.

3. Заключение

Конструкция плоского диффузионного р-п –перехода такова, что вокруг его периферии присутствует определяемая плотностью потока вектора смещения через боковую поверхность ОПЗ электростатическое поле периферии E^* . Наличие в плоском кремниевом р-п –переходе такого электрического поля приводит к тому, что электростатический потенциал поверхности круглого p^+ -контакта всегда превышает электростатический потенциал окружающей его полупроводниковой поверхности n-типа проводимости. Прямая зависимость значений E^* от площади выпрямляющего контакта является причиной увеличения электростатического потенциала поверхности p^+ -контакта при увеличении его диаметра. Поле E^* может быть непосредственно измерена в АСМ-методе зонда Кельвина, так как входит в электрический контур измерительной схемы атомно-силового микроскопа.

Список литературы

- [1] Торхов Н.А. Влияние периферии контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки на их статические вольтамперные характеристики. ФТП. 2010. Т. 44. № 5. С. 615-627.

- [2] Торхов Н.А., Новиков В.А. Влияние периферии контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки на их электрофизические характеристики. ФТП. 2011. Т. 45. № 1. С. 70-86.
- [3] Торхов Н.А. Влияние электрического поля периферии на вентильный фотоэффект в контактах металл-полупроводник с барьером Шоттки. ФТП. 2018. Т. 52. № 10. С. 1150-1171.
- [4] Торхов Н.А., Макаров А.В., Ромась Л.М., Гарбер Н.Г., Филимонова И.Д., Новиков В.А. Эффекты самоорганизации в процессах диффузии бора в кремний из твердых планарных источников. 9-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. «Мокуровские чтения», 23 мая 2018, сборник трудов, г., Москва, 108-109.
- [5] Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. (Нижний Новгород, РАН Институт физики микроструктур, 2004).
- [6] Torkhov N.A., Bozhkov V.G., Novikov V.A., Ivonin I.V. Investigation of Electric Fields in Ni/GaN Metall-Semiconductor Contacts with a Schottky Barrier by Atomic-Force Microscopy. 25-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Материалы конференции 6—12 сентября 2015 г. Севастополь, Крым, Россия. 6—12 September, Sevastopol, Crimea 611-612. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788.

References

- [1] Torkhov, N.A. Effect of the periphery of metal-semiconductor contacts with Schottky barriers on their static current-voltage characteristic //Semiconductors, (2010), V. 44(5), pp. 590-601.
- [2] Torkhov, N.A., Novikov, V.A. The effect of the periphery of metal-semiconductor Schottky-barrier contacts on their electrical characteristics //Semiconductors, (2011), V. 45(1), pp.69-84.
- [3] Torkhov, N.A. Effect of the electric field of the periphery on the gate effect in metal-semiconductor contacts with a Schottky barrier //Semiconductors, (2018), V. 52(10), pp.1150-1171.
- [4] Torkhov N.A., Makarov A.V., Romas L.M., Garber N.G., Filimonova I.D., Novikov V.A. Effects of self-organization in the diffusion of boron into silicon from solid planar sources //9th International Scientific and Practical Conference on the physics and technology of nano-heterostructural microwave electronics, "MOKEROV READINGS", Moscow, May 23 2018, pp. 108-109.
- [5] Mironov V.L. Fundamentals of scanning probe microscopy. Technosphere, Moscow, 2004, P.144, ISBN 5-94836-034-2.
- [6] Torkhov N.A., Bozhkov V.G., Novikov V.A., Ivonin I.V. Investigation of Electric Fields in Ni/GaN Metall-Semiconductor Contacts with a Schottky Barrier by Atomic-Force Microscopy. 2015 25th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2015). 6—12 September, Sevastopol, Crimea 611-612. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788.

Способ создания полосно-заграждающих фильтрующих элементов на основе концентрических разрезных колец в полосковых линиях передач СВЧ и КВЧ диапазонов

Малышев И.В., Николаев Е.В.

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного Федерального Университета,
ул. Шевченко, 2, г. Таганрог, Ростовской области, 347922, Россия
ivmalyshev@sfedu.ru

Аннотация: Представлены результаты расчетного САПР-моделирования проводящей конструкции, состоящей из диэлектрической подложки с двумя концентрическими разрезными кольцами (двойного кольцевого разрезного резонатора), на обратной стороне, и копланарной линии передачи СВЧ – мощности, на лицевой стороне. Проведено сопоставление этих результатов с экспериментальными снятыми на изготовленном макете. Обнаружена новая возможность перестройки резонансной частоты полосно-заграждающего фильтра в диапазоне до 50% путём вращения колец вокруг их центра.

Ключевые слова: двойной разрезной кольцевой резонатор, полосковые (копланарные) линии передачи, S-параметры проводящей структуры, АЧХ, диэлектрическая проницаемость материала подложки, полосно-заградительный фильтр.

1. Введение

Среди разработок фильтрующих элементов, ограничивающих полосу пропускания по полосно-заградительному типу, практическое преимущество имеют композиционные структуры, которые обладают резонансными свойствами в заданных полосах частот [1]. Уже исследованы многие конфигурации таких включений, размещённых как на поверхности проводящей подложки в составе линий передачи (например, полоскового или копланарного типов), так и внутри этой подложки [2-3]. В данной работе проведены расчётные и экспериментальные исследования участка копланарной линии передачи, у которой на обратной стороне от проводящего полоска размещена фильтрующая структура в виде двух концентрических полосковых колец, имеющих разрезы в диаметрально противоположных направлениях (Рис.1).

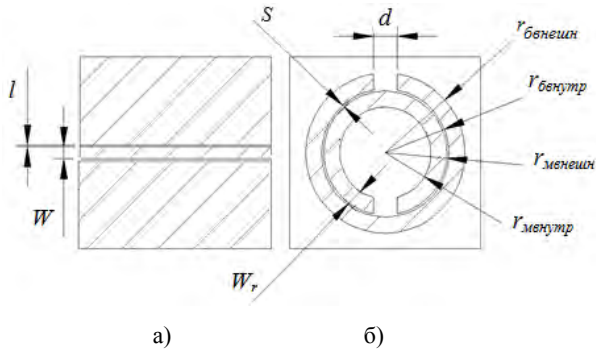


Рис. 1 – структура фильтрующего элемента на диэлектрической подложке: а) лицевая сторона; б) обратная сторона

2. Методика расчёта исследуемой модели

Проведём расчеты для такой разрезной двухкольцевой структуры с резонансной частотой $f = 2$ ГГц ($\lambda = 15$ см). При этом выберем толщину кольца равной толщине металлизации копланарного тракта $a = 3,5 \cdot 10^{-5}$ м [3].

Диаметр внешнего кольца $D_{\text{бвнешн}}$ должен быть меньше $\frac{\lambda}{4}$ [4,5]. Выберем

$D_{\text{бвнешн}} = \frac{\lambda}{7} = 2 \cdot 10^{-2}$ м, откуда внешний радиус большого кольца

$r_{\text{бвнешн}} = \frac{D_{\text{бвнешн}}}{2} = 1 \cdot 10^{-2}$ м. Из соображений соизмеримости параметров,

выбираем значение ширины проводящих полосков обоих колец:

$W_r = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Малый радиус внутреннего кольца: $r_{\text{бвнутр}} = r_{\text{бвнешн}} - W_r = 8 \cdot 10^{-3}$ м.

Очевидно, что проводимость зазора S между кольцами, имеет ёмкостной характер, а проводимость обеих колец – индуктивный. Для выбранного примера примем: $S = 25 \cdot 10^{-5}$ м. Следовательно, радиусы для внутреннего кольца будут иметь размеры: $r_{\text{мвнешн}} = r_{\text{бвнутр}} - S = 7,75 \cdot 10^{-3}$ м; $r_{\text{мвнутр}} = r_{\text{мвнешн}} - W_r = 5,75 \cdot 10^{-3}$ м.

Для уменьшения ёмкости между концами каждого кольца необходимо выбрать это расстояние сопоставимым с шириной зазора S между кольцами, поэтому выбираем размер разреза в кольцах: $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

Полная индуктивность конструкции двойного разрезного кольца L представляет собой статический электромагнитный параметр одного кольца, имеющего ширину равную ширине кольца резонатора и средний для рассматриваемых колец радиус r_{ck} , который вычисляется как [6]:

$$r_{ck} = r_{\text{бвнутр}} + \frac{S}{2} = 8,125 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для резонансных частот СВЧ и КВЧ диапазонов справедливо соотношение [6,7]:

$$L = \mu_0 r_{ck} (\ln \frac{8r_{ck}}{d+r}) = 3,58 \cdot 10^{-8} \text{ Гн.} \quad (1)$$

А для резонансной частоты двойного разрезного кольцевого резонатора получим общую ёмкость: $C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} = 1,76 \cdot 10^{-13} \text{ Ф.}$

С другой стороны, эту ёмкость определяют из соотношения [6]:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 C_{p.u.l.}}{4}. \quad (2)$$

Параметр $r_o = r_{\text{бвнешн}} - C - d = 6,71 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ необходим также для расчёта удельной ёмкости: $C_{p.u.l.} = \frac{4C}{2\pi r_o} = 1,67 \cdot 10^{-11} \text{ Ф.}$ (Эта формула и (2) представ-

ляют собой взаимозависимые соотношения. Они могут быть использованы в расчётах в зависимости от исходных параметров задачи.) Далее опреде-

ляем толщину диэлектрической подложки h из соотношения: $h = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 C}{6C_{p.u.l.}}$,

где ϵ_r и ϵ_0 – диэлектрические проницаемости материала подложки и вакуума соответственно.

В качестве примера, для дальнейших расчётов выберем наиболее распространённые значения диэлектрической проницаемости: $\epsilon_r = 2; 4; 6; 10$. Этим параметрам будут соответствовать значения толщин подложки: $h = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ м; } 7,03 \cdot 10^{-4} \text{ м; } 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м; } 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$ соответственно. Для нашего случая выберем в качестве диэлектрического материала подложки стеклотекстолит FR4 с $\epsilon_r = 4, (h = 7,03 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,7 \text{ мм})$ [7-10]. Для этого значения могут подходить типовые величины толщин этого материала: 0,5 мм и 1 мм.

Итак, для компьютерного моделирования используем параметры СВЧ копланарной линии передачи: $W = 9 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, которые обеспечивают значения сопротивлений входа и выхода равными 50 Ом на частоте 2 ГГц. Расчёт выполнен с помощью компьютерного приложения для анализа высокочастотных устройств.

3. Практические результаты

Рассчитанная структура двойного разрезного резонатора смоделирована в САПР полного электромагнитного моделирования [9-10]. Полученный график отображающий частотную зависимость коэффициента передачи СВЧ мощности S_{21} представлен на Рис.2 (график (1)). Учитывая, что в начале расчётов ширина колец выбиралась эмпирически, то при вариации этого параметра до $W_r = 1 \cdot 10^{-3}$ м = 1 мм, была получена скорректированная характеристика, у которой резонансная частота практически совпала с расчётной, что отражено на графике (2) Рис.2.

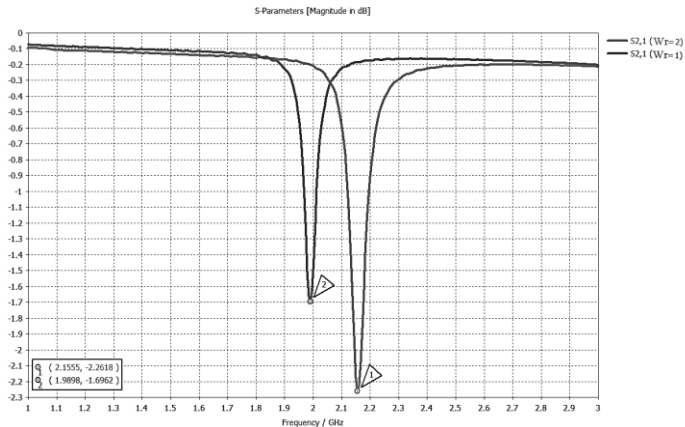


Рис. 2 – Частотная характеристика S_{21} кольцевого резонатора при:
 $W_r=2$ мм - (1) и $W_r=1$ мм – (2)

Очевидно, что фильтрующие свойства при $W_r=1$ мм обеспечивают заданные расчётные параметры с наибольшей точностью. Аналогичным образом были рассчитаны частотно зависимые параметры фильтрующих конфигураций для двойных кольцевых резонаторов с резонансными частотами равными: 1 ГГц, 1.5 ГГц, 2 ГГц, 2.5 ГГц, 3 ГГц. Основные результаты представлены в виде графиков на Рис.3 и Рис.4, при постоянных параметрах W_r и S .

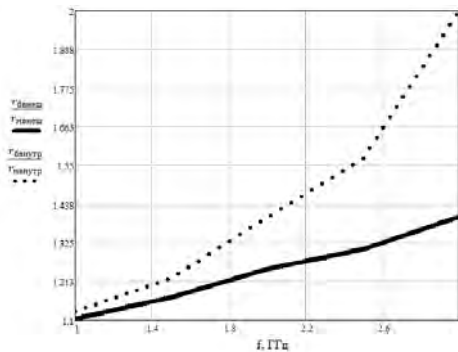


Рис. 3 – Частотные зависимости отношений радиусов

$$\text{колец } \frac{r_{\text{внеш}}}{r_{\text{внеш}}} \text{ и } \frac{r_{\text{внутр}}}{r_{\text{внутр}}}$$

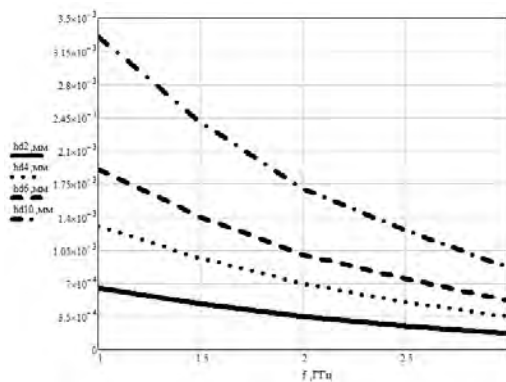


Рис. 4 – Частотные зависимости толщин диэлектрического материала $h=h_d$ при $\epsilon_r=2$

$$(h_d2), \epsilon_r=4 (h_d4), \epsilon_r=6 (h_d6), \epsilon_r=10 (h_d10)$$

Величиной толщины подложки можно также управлять АЧХ параметра S_{21} , что проиллюстрировано на Рис.5.

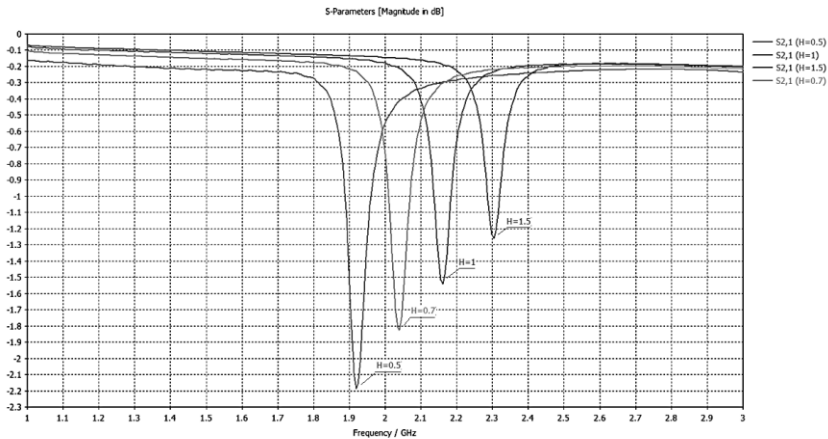


Рис.5 – Частотные зависимости параметра коэффициента передачи S_{21} для различных значений толщин подложки $H=h$

Наиболее интересный результат заключается в том, что в процессе САПР моделирования обнаружена новая возможность перестройки резонансной частоты фильтра в диапазоне до 50% путём вращения колец вокруг их центра, что проиллюстрировано на Рис.6.

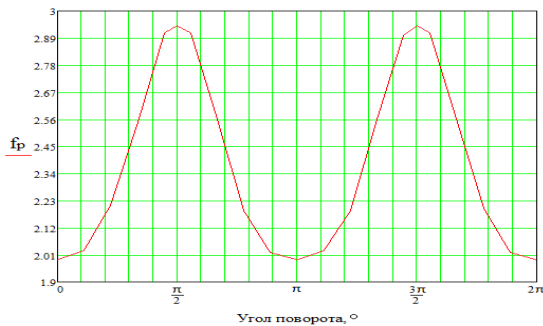


Рис. 6 – Зависимость резонансной частоты фильтрующей структуры $f = f_p$ (ГГц) от угла поворота резонатора α (град)

Однако при таком вращении в указанном частотном диапазоне будут меняться как параметр КСВН σ в диапазоне 1,1 – 1,8, так и параметр S_{21} в диапазоне $(-0,7) - (-3,8)$ дБ, что представляет некоторое неудобство для согласования всей линии передачи с нагрузкой. Несмотря на это, указанный эффект может иметь практическую реализацию в виде мобильного

построечного узла, который возможно разместить под проводящей полосковой линией передачи и перестраивающего полосу пропускания путём механического вращения плоскости с нанесёнными разрезными кольцами (Рис.7). Вся конструкция этого узла крепится под проводящим участком копланарной линии передач в удобном для монтажа месте. При этом желательно обеспечить равенство диэлектрических проницаемостей подложки с кольцами и подложки копланарной линии передачи.

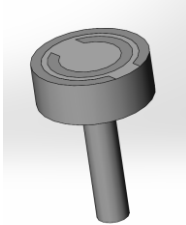


Рис. 7 – Конструкция мобильного двойного кольцевого построечного полосно-заградительного узла



Рис. 8 – Макет одноэлементной структуры разрезного резонатора для экспериментальной проверки результата моделирования

Практическая проверка этих результатов проводилась на макете, изготовленном на описанной подложке и имеющем полученные расчётные размеры для частоты 2 ГГц (Рис.8). На Рис.9 приведена экспериментальная частотная характеристика данного макета, снятая на анализаторе сигналов, которая демонстрирует практически полное совпадение с результатами моделирования.

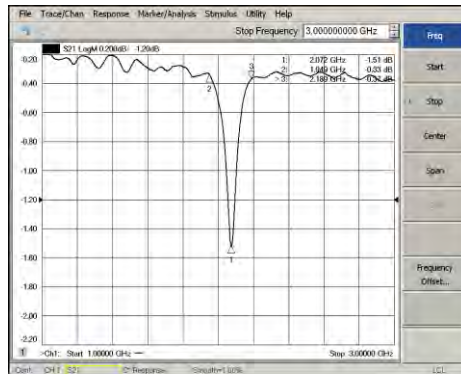


Рис.9 – Экспериментальная частотная зависимость параметра S_{21} макета Рис.8

4. Заключение

1. Двойные разрезные кольцевые резонаторы представляют собой эффективную полосно-заградительную композиционную структуру для копланарных, полосковых и подобных им линий передачи. Предложенная методика расчёта параметров таких структур с высокой точностью подтверждается экспериментально.
2. Найдены удобные методы перестройки частоты и величины коэффициента передачи путём подбора и корректировки электрофизических параметров, таких, как толщина подложки, радиусы колец и ширины разреза в них. Причём эти уточняющие расчёты удобнее всего осуществлять после проведения предварительного моделирования всей структуры.
3. Определена новая возможность перестройки частоты (в диапазоне около 50% от резонансной) путём создания мобильных вращающихся модульных структур, расположенных под проводящей линией в удобном для монтажа месте.

Список литературы

- [1] Wenshan C. Optical Metamaterials Fundamentals and Applications. - Springer Science & Business Media, - 2009.- 200 p.
- [2] Zhu, Z. et al. Broadband plasmon induced transparency in terahertz metamaterials // Nanotechnology 24.- 2013.P. 214003.
- [3] Zhang, K. et al. Dual-mode electromagnetically induced transparency and slow light in a terahertz metamaterial. // Opt. Lett. – 2014. no. 39, p.3539–3542.
- [4] Rizza C., Falco A., Scalora M., Ciattoni A. One-Dimensional Chirality: Strong Optical Activity in Epsilon-Near-Zero Metamaterials. // Phys. Rev. Lett. – 2015. P. 115 (5): 057401.
- [5] D. Szond. New materials developed that are as light as aerogel, yet 10,000 times stronger. - Gizmag. – 2014. p. 2903.
- [6] Калантаров П.Л. Л.А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. Изд-во: Ленинград - Энергоатомиздат,- 1986.- 488 с.
- [7] L.-H. Hsieh, K. Chang Equivalent lumped elements G, L, C, and unloading Q's of closed- and open-loop ring resonators // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 2.-2002. p. 453-460.
- [8] A. Deleniv, S. Gevorgian Open resonator technique for measuring multilayered dielectric plates // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 53, no. 9. – 2005. p. 2908-2916.
- [9] Baena J.D. Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators// J.D.Baena, R.Marques, F.Medina.-Physical Review B69, -2004. P.014402 (1-5).
- [10] http://www.pselektro.ru/fr_4/ (дата обращения: 25.01.2018).

Waveguide systems based on microwave photonic crystals with flat electrically controlled amplitude-frequency characteristics

¹Usanov D.A., ²Nikitov S.A., ¹Skripal A.V.,
³Merdanov M.K., ¹Evteev S.G., ¹Ponomarev D.V.

¹Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky
 83 Astrakhanskaya Street, Saratov, 410012, Russia
 usanovda@info.sgu.ru

²Institute of Radio-engineering and Electronics of RAS n.a. V.A. Kotelnikov RAS
 7 Building, 11 Mohovay str., Moscow, 125009, Russia
 nikitov@cplire.ru

³JSC "Research and production association "Electronic device engineering"
 2 Building, 2nd Boevskay str., Moscow 107014, Russia
 merdanov@rambler.ru

Abstract: Waveguide systems based on microwave photonic crystals with plane electrically controlled amplitude-frequency characteristics have been investigated. The scheme of electrically controlled microwave signal modulator and switch based on the photonic crystal with the use of the Y-circulator and provided locking losses of -43.27 dB and direct losses equal to -0.82 dB has been created.

Keywords: microwave photonic crystals, resonant diaphragm, photonic band gap, filter, Y-circulator, n-i-p-i-n-diode.

Волноводные системы на основе СВЧ фотонных кристаллов с плоскими электрически управляемыми амплитудно-частотными характеристиками

¹Усанов Д.А., ²Никитов С.А., ¹Скрипаль А.В.,
³Мерданов М.К., ¹Евтеев С.Г., ¹Пономарев Д.В.

¹ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
 ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия
 usanovda@info.sgu.ru

² ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН
ул. Моховая 11, корп. 7, г. Москва, 125009, Россия
nikitov@cplire.ru
³ АО «НПЦ «Электронное приборостроение»
ул. Боевская 2-я, д.2, г. Москва, 107014, Россия
merdanov@rambler.ru

Аннотация: Исследованы волноводные системы на основе СВЧ фотонных кристаллов с плоскими электрически управляемыми амплитудно-частотными характеристиками. Реализована схема электрически управляемого модулятора и переключателя СВЧ-сигнала на основе фотонного кристалла с использованием Y -циркулятора, позволяющая обеспечить потери запираания -43.27 дБ и прямые потери равные -0.82 дБ.

Ключевые слова: СВЧ фотонные кристаллы, резонансная диафрагма, фотонная запрещенная зона, фильтр, Y -циркулятор, $n-i-p-i-n$ -диод.

1. Введение

В настоящее время одной из областей практического применения СВЧ фотонных кристаллов является создание полосовых фильтров [1–5]. Отличительной особенностью фотонных кристаллов является наличие зоны, запрещенной для распространения волн в определенном диапазоне частот, как правило, вследствие почти полного отражения электромагнитной волны. Высокая отражательная способность в фотонной запрещенной зоне может быть использована для формирования плоской частотной характеристики фильтра. Реализацию такой возможности удобно осуществить в устройстве с СВЧ-циркулятором, в котором фотонный кристалл используется в качестве отражающего элемента, включенного в одно из плеч циркулятора (рис. 1, 3).

2. Фотонный кристалл на основе волновода с диэлектрическим заполнением

Коэффициент прохождения электромагнитной волны в разрешенной зоне СВЧ фотонного кристалла имеет «изрезанную» частотную характеристику. Уменьшение изрезанности может быть достигнуто увеличением числа ячеек фотонного кристалла, однако при этом увеличиваются потери пропускания в реальных структурах. Эта проблема может быть решена с помощью использования Y -циркулятора, в одно из плеч которого включен фотонный кристалл. Поскольку при подаче входного сигнала на вход 1 идеального Y -циркулятора сигнал на выход 3 Y -циркулятора поступает

только при наличии отраженной волны на выходе 2 Y -циркулятора, то при подключении фотонного кристалла с согласованной нагрузкой на выходе 2 Y -циркулятора, коэффициент прохождения $|D|^2$ сигнала с входа 1 Y -циркулятора на выход 2 Y -циркулятора определяется коэффициентом отражения фотонного кристалла $|R|^2$, с использованием соотношения:

$$|D|^2 = |R|^2$$

Таким образом, в области частот, определяющих запрещенную зону фотонного кристалла, $|R|^2 \approx 1$, коэффициент прохождения $|D|^2$ сигнала с входа 1 Y -циркулятора на выход 3 Y -циркулятора близок к единице, что обеспечивает формирование разрешенной зоны с частотно независимым коэффициентом прохождения электромагнитного излучения.

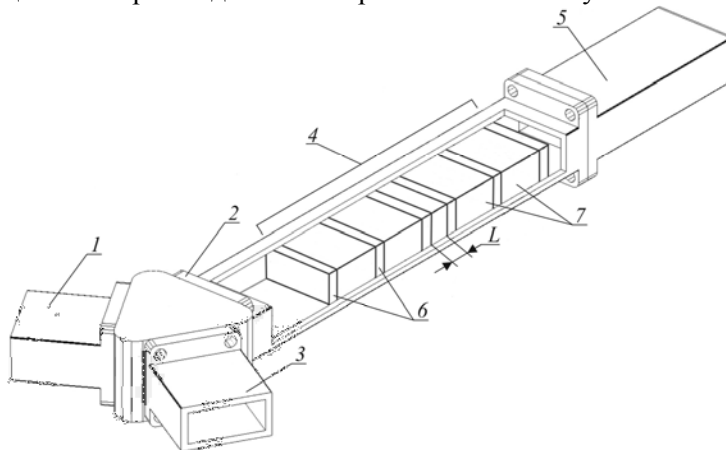


Рис. 1. Фотонный кристалл с диэлектрическим заполнением в схеме на отражение с Y -циркулятором. 1 – вход Y -циркулятора, 2, 3 – выходы Y -циркулятора, 4 – фотонный кристалл, 5 – согласованная нагрузка, 6 – слои фторопласта, 7 – слои пенопласта. L – длина нарушенного слоя

Fig. 1. Photonic crystal with dielectric filling in the reflection scheme with Y -circulator. 1 – input of Y -circulator, 2, 3 – outputs of Y -circulator, 4 – photonic crystal, 5 – matched load, 6 – teflon layers, 7 – foam layers. L – the length of the defect layer

Рассматривался одномерный волноводный фотонный кристалл из 11 слоев в диапазоне частот 8–12 ГГц. Нечетные слои были выполнены из тефлона ($\varepsilon = 2.1$, длина 4.15 мм), четные – из пеноплат ($\varepsilon = 1.03$, длина 12.7 мм). Нарушение периодичности создавалось посредством изменения длины центрального слоя ($L = 5$ мм).

Входной сигнал подавался на вход 1 Y-циркулятора, к выходу 2 Y-циркулятора был подключен фотонный кристалл 4 с согласованной нагрузкой 5, выходной сигнал измерялся на выходе 3. Измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) коэффициентов пропускания и отражения исследуемых фотонных кристаллов проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent Microwave Network Analyzer N5242A PNA-X в диапазоне частот 8–12 ГГц.

Как следует из результатов эксперимента частотная зависимость коэффициента прохождения сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с фотонным кристаллом в схеме на отражение характеризуется наличием плоской разрешенной зоны, в диапазоне частот 8.7–10.4 ГГц (кривые 1 на рис. 2), то есть зоны с частотно независимым коэффициентом прохождения равным $|D|^2 \approx 1.00$. При длине нарушенного слоя $L=5$ мм резонансная особенность в запрещенной зоне (кривая 2 на рис. 2) возникает на частоте $f_{1\text{эксп}}=9.294$ ГГц, а разрешенная зона расширяется до значений 8.35–10.8 ГГц.

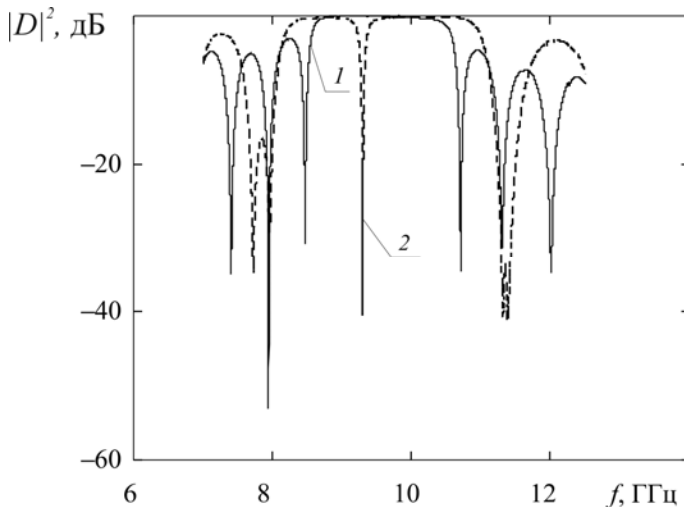


Рис. 2. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с фотонным кристаллом в схеме на отражение. 1 – без нарушения, 2 – с измененной длиной центрального слоя $L=5$ мм

Fig. 2. Experimental frequency dependences of the transmission coefficient $|D|^2$ of the signal from the Y-circulator arm 1 to the arm 3 with the photonic crystal in the reflection scheme. 1 – without defect, 2 – with the changed length of the central layer $L=5$ mm

3. Фотонный кристалл на основе волновода с резонансными диафрагмами с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками

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 [6]. Ширина и высота щелей диафрагм фотонного кристалла выбирались равными 20 мм и 2 мм, соответственно.

Для управления резонансными свойствами 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 10.5×1.0 мм².

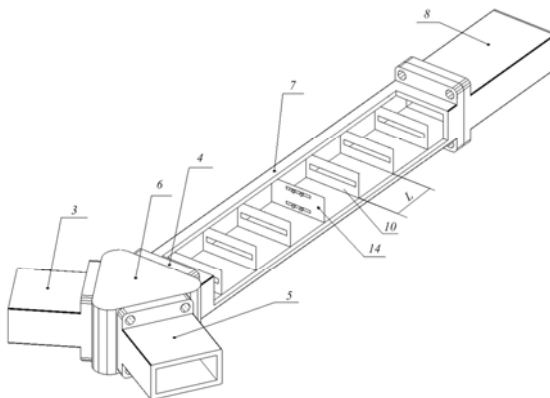


Рис. 3. Фотонный кристалл на резонансных диафрагмах в схеме на отражение с Y -циркулятором. 1 – вход Y -циркулятора, 2, 3 – выходы Y -циркулятора, 4 – фотонный кристалл, 5 – согласованная нагрузка, 6 – диафрагмы, 7 – центральная диафрагма с $n-i-p-i-n$ -диодными структурами

Fig. 3. Photonic crystal on resonant diaphragms in the reflection scheme with Y -circulator. 1 – input of Y -circulator, 2, 3 – outputs of Y -circulator, 4 – photon crystal, 5 – matched load, 6 – diaphragm, 7 – central diaphragm with $n-i-p-i-n$ -diode structures

Как следует из результатов эксперимента частотная зависимость коэффициента прохождения сигнала из плеча 1 в плечо 3 Y -циркулятора с фотонным кристаллом в схеме на отражение характеризуется наличием плоской разрешённой зоны в диапазоне частот 8.2–10.2 ГГц (кривая 1 на

рис.4). Введение в фотонный кристалл $n-i-p-i-n$ -матрицы в качестве нарушения приводит к возникновению резонансной особенности – примесной моды затухания колебаний в разрешенной зоне фотонного кристалла на частоте $f=9.56$ ГГц при увеличении тока до значений больших 0.66 мА. При этом на частоте резонанса с увеличением протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока в диапазоне от 0.66 мА до 8.15 мА коэффициент прохождения уменьшается от -0.82 дБ до -43.27 дБ.

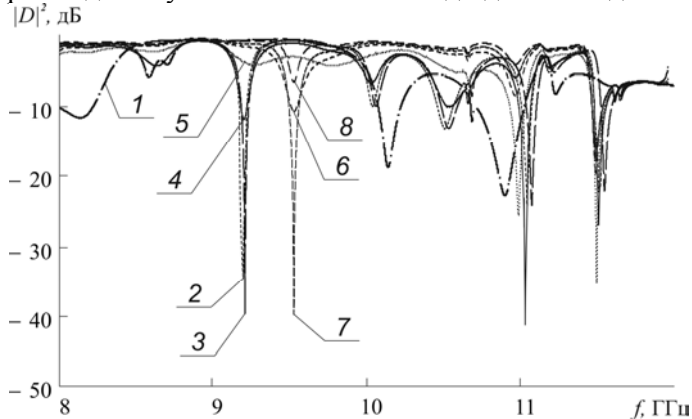


Рис. 4. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ сигнала из плеча 1 в плечо 3 Y-циркулятора с фотонным кристаллом в схеме на отражение. 1 – без нарушений, 2–8 – с управляющей $n-i-p-i-n$ -матрицей в качестве нарушения центрального слоя при различных значениях управляющего тока I , мА: 2 – 0.0, 3 – 0.0005, 4 – 0.092, 5 – 0.660, 6 – 3.36, 7 – 8.15, 8 – 193.5

Fig. 4. Experimental frequency dependences of the transmission coefficient $|D|^2$ of the signal from the Y-circulator arm 1 to the arm 3 with the photonic crystal in the reflection scheme. 1 – without defect, 2–8 – with control $n-i-p-i-n$ -matrix as a defect of the central layer at different values of the control current I , mA: 2 – 0.0, 3 – 0.0005, 4 – 0.092, 5 – 0.660, 6 – 3.36, 7 – 8.15, 8 – 193.5

4. Заключение

Таким образом, экспериментально реализованы два типа СВЧ фотонных кристаллов на основе прямоугольных волноводов с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами, демонстрирующие наличие плоской разрешенной зоны в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Схема электрически управляемого модулятора и переключателя СВЧ-сигнала на основе фотонного кристалла, реализованная с использованием Y-циркулятора, позволяет обеспечить потери запираения -43.27 дБ и прямые потери равные -0.82 дБ.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ) и стипендии Президента РФ (СП-3301.2018.3).

Список литературы

- [1] Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 184 с.
- [2] Belyaev B.A., Voloshin A.S., Shabanov V.F. Study of microstrip models of bandpass filters based on 1D photonic crystals // *Doklady Physics*. 2005. V. 50. No 1. P 7–11.
- [3] Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2001. V. 49. No 2. P. 297–306.
- [4] Gomez A., Vegas A., Solano M.A. & Lakhtakia A. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies // *Electromagnetics*. 2005. V. 25. No 5. P. 437–460.
- [5] Yokoi N., Fujisawa T., Saitoh K., Koshiba M. Apodized photonic crystal waveguide gratings // *Optics Express*. 2006. V. 14. No 10. P. 4459–4468.
- [6] Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками // *Радиотехника и электроника*. 2018. Т. 63. № 1. С. 65–71.

References

- [1] Usanov D.A., Nikitov S.A., Skripal A.V., Ponomarev D.V. *Odnomernye SVCH fotonnye kristally. Novye oblasti primeneniya* / M.: FIZMATLIT, 2018, 184 p. (In Russian).
- [2] Belyaev B.A., Voloshin A.S., Shabanov V.F. Study of microstrip models of bandpass filters based on 1D photonic crystals // *Doklady Physics*, 2005, vol. 50, no. 1, pp 7–11
- [3] Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials// *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 2001, vol. 49, no. 2. pp. 297–306.
- [4] Gomez A., Vegas A., Solano M.A. & Lakhtakia A. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies // *Electromagnetics*, 2005, vol. 25, no. 5, pp. 437–460..
- [5] Yokoi N., Fujisawa T., Saitoh K., Koshiba M. Apodized photonic crystal waveguide gratings // *Optics Express*, 2006, vol. 14, no. 10, pp. 4459–4468.
- [6] Usanov D.A., Nikitov S.A., Skripal A.V., Merdanov M.K., Evteev S.G. Volnovodnye fotonnye kristally na rezonansnykh diafragmakh s upravlyaemyi $n-i-p-i-n$ -diodami kharakteristikami // *Radiotekhnika i elektronika*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 65–71. (In Russian).

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state task No. 8.7628.2017/BCH) and Scholarships of the President of the Russian Federation (SP-3301.2018.3).

Manufacturing technology of magnetoelectric layered and bulk structures

¹Ivanov S.N., ²Semenov G.A., ²Bichurin M.I.

¹JSC «OKB-Planeta»

Fedorovskiy ruchey st., 2/13, Velikiy Novgorod, 173004, Russian Federation

IvanovSN@okbplaneta.ru

²Novgorod State University Yaroslav-the-Wise

Bol'shaya Sankt-Peterburgskaya st., 41, Velikiy Novgorod, 173003, Russian Federation

evrazianov@mail.ru

Abstract: The results of studies of the optimal technology for the production of magnetoelectric layered structure based on yttrium-iron garnet $Y_3Fe_5O_{12}$ and lead zirconate titanate (PZT) thick films are presented. The minimum width of the ferromagnetic resonance line of the disk with a diameter of 3 mm and a thickness of 80 μm formed in thick YIG film by wet chemical etching in H_3PO_4 through the mask $SiO_2/Ti/Pt$ was 2,6 Oe. The maximum value of the permittivity of the thick PZT film, fabricated by screen-printing, was 435.

Keywords: magnetoelectric (ME) effect, ME microwave devices, ferromagnetic resonance line shift, yttrium-iron garnet $Y_3Fe_5O_{12}$ thick films, wet chemical etching, lead zirconate titanate (PZT) thick films, screen-printing.

Технология изготовления магнито- электрических слоистых и объемных структур

¹Иванов С.Н., ²Семенов Г.А., ²Бичурин М.И.

¹ОАО «ОКБ-Планета»

ул. Федоровский ручей, 2/13, Великий Новгород,

173004, Российская Федерация

IvanovSN@okbplaneta.ru

²Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

ул. Б. Санкт-Петербургская, д.41, Великий Новгород,

173003, Российская Федерация

evrazianov@mail.ru

Аннотация: Представлены результаты исследований оптимальной технологии изготовления магнитоэлектрической слоистой структуры на основе толстых пленок иттрий-железистого граната $Y_3Fe_5O_{12}$ и цирконата-титаната свинца ЦТС-19. Минимальная ширина линии ферромагнитного резонанса диска диамет-

ром 3 мм и толщиной 80 мкм, сформированного в эпитаксиальной пленке $Y_3Fe_5O_{12}$ жидкостным химическим травлением в H_3PO_4 через маску $SiO_2/Ti/Pt$, составила 2,6 Э. Максимальное значение диэлектрической проницаемости толстой пленки ЦТС-19, изготовленной трафаретной печатью, составило 435.

Ключевые слова: магнитоэлектрический (МЭ) эффект, МЭ устройства СВЧ, сдвиг линии ферромагнитного резонанса, толстые пленки иттрий-железистого граната $Y_3Fe_5O_{12}$, жидкостное химическое травление, цирконат-титанат свинца (ЦТС), толстые пленки ЦТС, трафаретная печать.

1. Введение

Магнитоэлектрические (МЭ) материалы на сегодняшний день являются перспективными для создания устройств в широком диапазоне частот. В СВЧ диапазоне МЭ эффект наиболее ярко проявляется в виде сдвига линии ферромагнитного резонанса (ФМР) в электрическом поле [1]. На этом явлении разработан ряд устройств магнитного типа с электрическим управлением, например, фильтры, фазовращатели, аттенуаторы [2]. Основой таких устройств являются объемные или слоистые МЭ структуры.

Объемные МЭ структуры представляют собой смешанные в определенном соотношении порошки магнитострикционного и пьезоэлектрического материала, спеченные под давлением. Несмотря на простоту и доступность такой технологии объемные структуры по величине МЭ эффекта существенно уступают слоистым МЭ структурам, представляющим собой механически связанные магнитострикционные и пьезоэлектрические слои.

В настоящей работе представлены результаты исследований по разработке оптимальной технологии изготовления МЭ слоистых структур на основе толстых пленок для МЭ устройств СВЧ.

2. Технология магнитострикционной компоненты

Эпитаксиальные пленки иттрий-железистого граната $Y_3Fe_5O_{12}$, выращенные на подложках гадолиний-галлиевого граната $Gd_3Ga_5O_{12}$, благодаря узкой линии ФМР находят широкое применение. Традиционно из таких эпитаксиальных структур лазером вырезают образцы круглой или прямоугольной формы, на основе которых изготавливают МЭ слоистую структуру для устройств СВЧ. В этом случае по краю реза образуются дефекты и глубокий нарушенный слой, что приводит к уширению линии ФМР и появлению нежелательных мод в магнитном спектре [3]. Примене-

ние жидкостного химического травления позволяет формировать структуру с ровным краем и точными размерами.

В работе исследовалось влияние режимов травления на морфологию поверхности и ширину линии ФМР толстой эпитаксиальной пленки $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. В качестве травителя выступала концентрированная (87%) ортофосфорная кислота H_3PO_4 , которая обеспечивает высокую скорость (рис.1, а) и хорошую управляемость процесса травления.

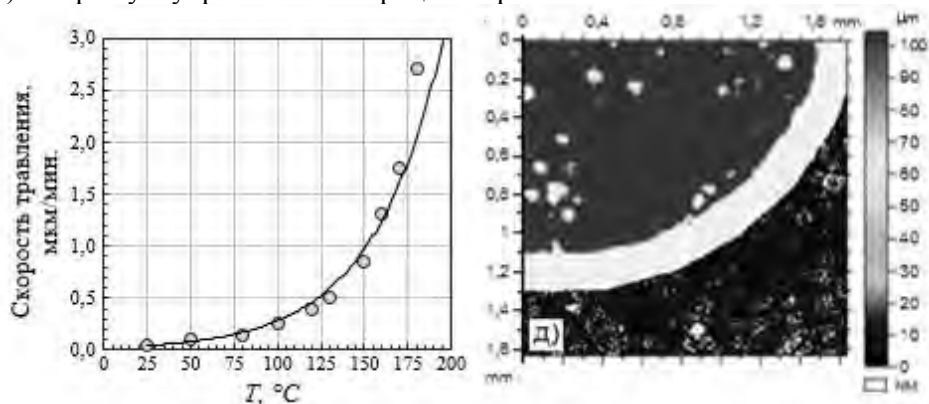


Рис. 1. Температурная зависимость скорости травления пленки $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ в H_3PO_4 (87%) (а) и поверхность образца, вытравленного через маску $\text{SiO}_{2(\text{м})}/\text{Ti}/\text{Pt}$ (б).

Fig. 1. The temperature dependence of the etching rate of the $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film in H_3PO_4 (87%) (а) and the surface of the sample etched through the $\text{SiO}_{2(\text{м})}/\text{Ti}/\text{Pt}$ mask (б).

Исследуемые образцы представляли собой подложки $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ с пленкой $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной 80 мкм, в которой вытравливались диски диаметром 3 мм через защитные маски.

Защитными масками выступали пленки диоксида кремния SiO_2 толщиной 1 мкм, система металлов Ti/Pt толщиной 0,03/0,1 мкм и комбинированные покрытия $\text{SiO}_2/\text{Ti}/\text{Pt}$. Пленки диоксида кремния использовались двух типов: полученные из гексаметилдисилоксана при температуре 100 $^\circ\text{C}$ ($\text{SiO}_{2(\text{гмдс})}$) и окислением моносилана при температуре 250 $^\circ\text{C}$ ($\text{SiO}_{2(\text{м})}$).

Защитные свойства используемых масок оценивались по наличию дефектов и протравов в защищаемой области пленки $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [4]. Лучший результат был получен при использовании комбинированного покрытия $\text{SiO}_{2(\text{м})}/\text{Ti}/\text{Pt}$ (рис.1, б), при этом, ширина линии ФМР составила 2,6 Э при касательном направлении магнитного поля (рис.2). Полученное значение соизмеримо с значениями, полученными в субмикронных пленках $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [5]. Остальные маски показали неудовлетворительный результат.

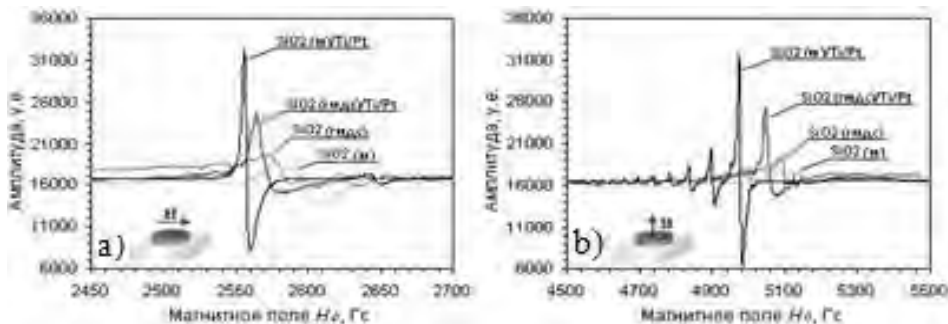


Рис. 2. Магнитные спектры изготовленных через различные маски образцов при касательном (а) и нормальном к поверхности направлении магнитного поля (б)

Fig. 2. Magnetic spectra of the samples made through different masks with in-plane (a) and out-of-plane to the surface direction of the magnetic field (b)

3. Технология пьезоэлектрической компоненты

Нанесение пьезоэлектрических пленок на эпитаксиальные пленки $Y_3Fe_5O_{12}$ вместо традиционного приклеивания пьезокерамических элементов позволяет создавать слоистые структуры по планарной технологии, повысить величину МЭ эффекта и обеспечить повторяемость параметров.

Перспективным методом нанесения толстых пленок является трафаретная печать, как за счет доступности оборудования и высокой скорости нанесения пленок, так и возможности управления свойствами получаемых пленок в широких пределах [6].

В работе исследовалось влияние режимов нанесения толстых пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС-19) методом трафаретной печати на их электрофизические свойства.

Пленки ЦТС-19 наносились на установке трафаретной печати через металлический трафарет 325 mesh на металлизированные подложки из пасты, состоящей из активного порошка, органической связки, компенсирующей окиси свинца и легкоплавкого стекла.

Исходный порошок просеивался и измельчался 72 часа в шаровой мельнице, в результате чего размер его частиц в среднем составил 3 мкм (см. рис.3).

При нанесении пленок использовались соотношения порошок/связка в пасте от 48%/52% до 80%/20%. Каждый нанесенный слой сушился при температуре 150°C в течение 15 мин., окончательное формирование пленки происходило после отжига в муфельной печи при температуре 700 - 900°C на воздухе.

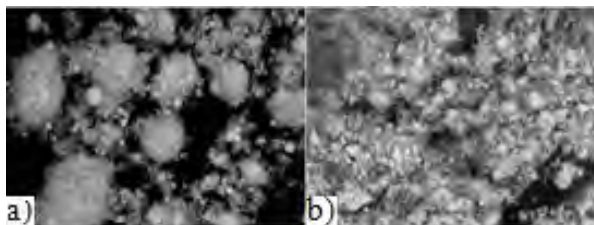


Рис. 3. Порошок ЦТС-19: исходный (а) и после измельчения (б).

Fig. 3. PZT powder: initial (a) and after milling (b).

В результате были получены пленки ЦТС-19 толщиной от 15 до 70 мкм с толщиной каждого слоя от 3 до 13 мкм (рис.4, а). Оптимальная температура отжига определялась эмпирическим путем и составляла 850°C.

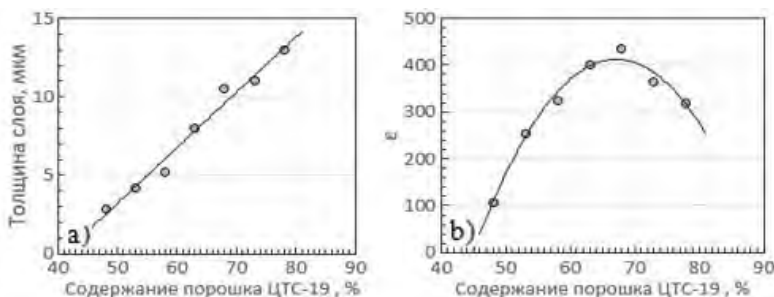


Рис. 4. Зависимость толщины наносимого слоя (а) и диэлектрической проницаемости (б) от содержания порошка ЦТС-19 в пасте.

Fig. 4. The dependence of the thickness of the growing layer (a) and dielectric permittivity (b) on the powder content of PZT in the paste

Пленки, нанесенные из пасты с долей активного порошка менее 50%, имеют островковую структуру. Получение пленок из пасты с содержанием порошка ЦТС более 80% затруднено из-за высокой вязкости пасты. Для компенсации испаряющегося при отжигах из пленок свинца вводилась компенсирующая добавка PbO в размере до 3% массовой доли пасты.

Максимальное значение $\epsilon = 435$ было получено в пленке толщиной 52 мкм, полученной из пасты, состоящей из 68% порошка ЦТС-19, 29% органической связки и 3% окиси свинца (рис. 4, б). Полученное значение существенно превышает значение, полученное, например, в работе [7]. Вжигание проводилось на воздухе при температуре 850°C 10 мин.

Сдвиг вправо температуры точки Кюри исследуемых пленок в сторону больших температур может быть связан с наличием воздушных пор в объеме пленки (рис.5).

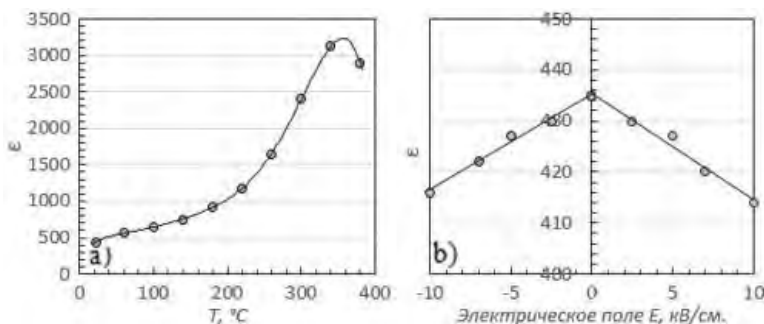


Рис. 5. Зависимости диэлектрической проницаемости от температуры (а) и электрического поля (б) в плёнке ЦТС-19.

Fig. 5. Dependences of dielectric permittivity on temperature (a) and electric field (b) in the PZT film

4. Заключение

В работе были рассмотрены особенности травления толстых эпитаксиальных пленок $Y_3Fe_5O_{12}$ в концентрированной ортофосфорной кислоте через защитные маски и влияние состава пасты, режимов термообработки на электрофизические параметры толстых пленок ЦТС, полученных трафаретной печатью.

Полученные результаты позволяют говорить о том, что рассматриваемая технология может найти применение при изготовлении перестраиваемых МЭ устройствах СВЧ с широким диапазоном перестройки и высокой добротностью. Дальнейшие исследования будут направлены на снижение температуры отжига пленки ЦТС-19 и получение линии ФМР $Y_3Fe_5O_{12}$ порядка 1 Э.

Источники финансирования и выражение признательности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-48-530190 p_a.

Список литературы

- [1] Bichurin M., Petrov V. Modeling of magnetoelectric effects in composites, Springer series in material science, V. 201, 2014, p.108.
- [2] Tatarenko A.S. Bichurin M.I. Microwave Magnetoelectric Devices. Advances in Condens. Matter Physics, 2012, v. 2012, pp. 1-10.
- [3] Юшук С.И., Юрьев С.А., Костюк П.С., Бондар В.И. Применение феррогранатовых эпитаксиальных структур в сверхвысокочастотной электронике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2005, №3, с.22-25.

[4] Иванов С.Н. Формирование ИЖГ-резонаторов методом жидкостного химического травления эпитаксиальных пленок // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции - М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2013, с.308-310.

[5] Carsten Dubs, Oleksii Surzhenko, Ralf Linke, Andreas Danilewsky, Uwe Brückner, Jan Dellith "Sub-micrometer yttrium iron garnet LPE films with low ferromagnetic resonance losses," J. Phys. D: Appl. Phys. 50 (2017).

[6] Иванов С.Н., Семенов Г.А. Технология нанесения толстых пленок цирконата-титаната свинца методом трафаретной печати // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер.: Технические науки. 2016. № 7 (98). С.26–29.

[7] Буш А.А., и др. Толстополеночные слоистые композитные структуры цирконат-титанат свинца – феррит никеля-цинка: получение методом сеткотрафаретной печати и магнитоэлектрические свойства. ЖТФ. 2010, т.80. №3. С.69-76.

References

[1] Bichurin M., Petrov V. Modeling of magnetoelectric effects in composites, Springer series in material science, V. 201, 2014, p.108.

[2] Tatarenko A.S. Bichurin M.I. Microwave Magnetoelectric Devices. Advances in Condens. Matter Physics, 2012, v. 2012, pp. 1-10.

[3] Iushchuk S.I., Iur'ev S.A., Kostiuk P.S., Bondar V.I. Primenenie ferrogranatovykh epitaksial'nykh struktur v sverkhvysokochastotnoi elektronike // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2005. №3. S.22-25.

[4] Ivanov S.N. Formirovaniye IJG-rezonatorov metodom jidkostnogo himicheskogo travleniya epitaksial'nykh plenok // Tverdotel'naya electronica. Slojnyye funkcional'nie bloki REA. Materialy nauchno-tehnicheskoy konferencii – M.: MNTORES im. A.S. Popova, 2013, №73 T2. s. 97-100.

[5] Carsten Dubs, Oleksii Surzhenko, Ralf Linke, Andreas Danilewsky, Uwe Brückner, Jan Dellith "Sub-micrometer yttrium iron garnet LPE films with low ferromagnetic resonance losses," J. Phys. D: Appl. Phys. 50 (2017).

[6] Ivanov S.N., Semenov G.A. Technology of growing lead zirconate titanate thick films by screen printing // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2016. № 7 (98). P.26–29.

[7] Bush A.A., I dr. Tolstoplennochnye sloistie kompozitsionnye struktury tsirkonat-titanat svinca-ferrit nikelya-cinka: polucheniye metodom setkotrafaretnoy pechati I magnitoelektricheskie svoystva. JTF. 2010, t.80. №3. С.69-76.

Ансамбли спин-инжекционных излучателей на основе массива нанопроволок

¹Панас А.И., ²Гуляев Ю.В., ²Вилков Е.А., ²Максимов Н.А.,
²Чигарев С.Г., ³Михайлов Г.М., ³Черных А.В., ⁴Загорский Д.Л.,
^{4,5}Бедин С.А., ⁴Долуденко И.М., ⁴Шаталов А.С.

¹АО НПП «Исток» им. Шокина, г. Фрязино, 141190, Российская Федерация
airanas@istokmw.ru

²Институт радиотехники и электроники им. А.В. Котельникова РАН, г. Фрязино

³Институт проблем технологии микроэлектроники РАН, г. Черноголовка

⁴ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

⁵Московский педагогический государственный университет

Аннотация: Исследуется колебательная система, состоящая из группы (ансамбля) спин-инжекционных излучателей, основу которых составляют магнитные переходы с наноразмерными проволоками. Описывается структура экспериментального макета. Приводятся и анализируются результаты экспериментов. Продемонстрирована возможность генерации сигнала в диапазоне частот 16-18 ТГц.

Ключевые слова: магнитные переходы, терагерцовые (ТГц) электромагнитные колебания, спин-инжекционное излучение, наноразмерная проволока

1. Введение

Научно-технический прогресс предполагает освоение различных частотных диапазонов. И этот процесс постепенно развивается по мере появления новых активных элементов, материалов и технологий. Однако, в силу разных причин, не все диапазоны находятся в одинаковом положении с точки зрения их использования на практике. Так, существуют и проблемные диапазоны, среди которых выделяется терагерцовый (ТГц) диапазон, иногда называемый «терагерцовой дырой». Он расположен между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами, а его «проблемность» заключается в очень небольшом выборе существующих источников и приёмников терагерцового излучения, как правило, довольно габаритных и низкоэффективных. Ситуация осложняется и проблемами с измерительной аппаратурой в указанном диапазоне.

С другой стороны, свойства терагерцовых сигналов весьма привлекательны для потенциального практического применения. Тот факт, что ТГц излучение не является ионизирующим и, в отличие от рентгеновского

излучения, не наносит вреда организму делает их весьма перспективными для сканирующих систем безопасности и медицины. Потенциально широкие рабочие полосы привлекают специалистов для создания суперскоростных систем связи, а длины волн, соизмеримые с типовыми размерами микромира, интересны для решения различных материаловедческих проблем [1].

Отмеченные обстоятельства делают актуальными исследования по поиску новых научно-технологических решений, связанных с разработкой малогабаритных и, по-возможности, эффективных устройств излучения и приёма терагерцового излучения.

В последние 10-15 лет, преимущественно в России, развивается новое направление исследований, связанное с эффектом излучения терагерцовых сигналов (в диапазоне частот 3-40 ГГц) в магнитных переходах, сформированных из контактирующих слоёв ферромагнетиков и антиферромагнетиков, при протекании через них токов большой плотности. Начало исследованиям положили теоретические работы [2-3], предсказавшие возможность спин-инжекционного излучения в отмеченных структурах и объяснившие эффект. Далее последовали эксперименты, по мнению авторов подтверждавшие предсказанное теоретиками явление [4-5]. Публикации результатов экспериментов породили немало дискуссий, которые не утихают и по сегодняшний день. Вместе с тем, налицо и интерес к данной проблеме, демонстрируемый ведущими научно-техническими изданиями и специалистами.

Одно из направлений исследований последних лет в этом направлении связано с попытками авторов увеличить интегральную мощность терагерцового излучения. Её оценка в проведённых экспериментах достаточно груба и варьируется в пределах десятка – сотен микроватт, что недостаточно для потенциальных будущих применений. Интересные результаты были получены при помещении источника терагерцового излучения (излучателя) в резонатор с положительной обратной связью подобно лазерам. Показано [6-7], что такой подход позволяет резко увеличить интенсивность генерации. Другой подход связан с увеличением числа излучателей, что также приводит к увеличению мощности излучения.

Развитием второго подхода является и настоящая работа, цель которой - использование в качестве основных элементов излучателей массива наноразмерных проволок. В работе приведены результаты первых экспериментов и продемонстрирована возможность генерации сигнала в диапазоне частот 16-18 ТГц.

2. Структура экспериментального макета

Основной идеей представленной работы является использование структуры с массивом параллельных наноразмерных проволок для формирования в них магнитных переходов. О таких структурах известно с 90-х годов прошлого столетия [8]. Одним из способов их получения является матричный синтез, согласно которому заранее изготовленные микропоры в одном из материалов (матрицы) заполняются другим материалом. Распространённым вариантом данного способа является использование в качестве матрицы полимерных трековых мембран, поры в которых заполняются металлом (или несколькими металлами) методом гальванического осаждения. Такая технология даёт возможность получения нанопроволок, состоящих из нескольких (чередующихся) слоёв различных металлов (сплавов). Получаемые при этом структуры могут обладать гигантским магнетосопротивлением и применяются в качестве магнитных сенсоров и датчиков [9]. На рис. 1 представлена фотография структуры, полученная с помощью электронного микроскопа.

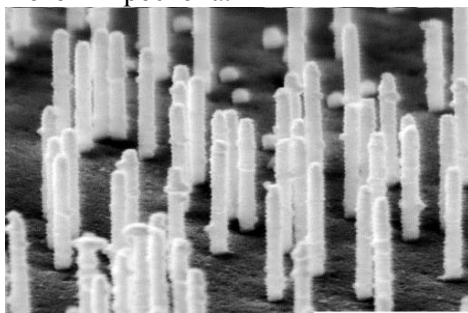


Рис. 1. Фотография структуры с массивом нанопроволок после удаления полимерной ростовой матрицы

Наноразмеры получаемых проволок и возможность синтезировать в каждой из них структуры с различными магнитными свойствами – ферромагнетик-ферромагнетик, ферромагнетик-антиферромагнетик, ферромагнетик-парамагнетик и т.п. – стимулировали идею о создании на их основе спин-инжекционных излучателей. В этом случае, когда необходимо создать лишь один переход, предпочтительно использование «двухваннового» метода, при котором синтезируемый массив переносится из одного раствора в другой, что существенно улучшает качество формируемых слоёв по сравнению с «однованным» методом [10].

Чтобы закончить формирование излучателей, необходимо обеспечить протекание тока через массив нанопроволок. С этой целью, на обе

поверхности трековых мембран наносятся слои металла, к которым подсоединяется источник электропитания. При этом, один из указанных слоёв должен быть полупрозрачен для терагерцового излучения.

3. Эксперименты

В экспериментальном макете, в качестве трековой мембраны использовалась полиэтиленовая плёнка, в которой предварительно были прошиты сквозные отверстия – поры, диаметром несколько десятков нанометров. В соответствии с указанным выше методом («двухваннным») поры заполнялись на 50% Fe и на 50% Ni. В качестве токоподводящего электрода (плёнки) на одну из поверхностей полиэтиленовой плёнки наносился слой меди, а на другую – слой никеля толщиной порядка 20 нм. Именно этот слой выполнял функцию полупрозрачного слоя для возникающего в магнитных переходах нанопроволок излучения терагерцового диапазона. К обоим металлическим слоям подсоединялись массивные токоподводящие электроды. Экспериментальная установка позволяла фиксировать спектры излучаемого сигнала при изменении тока источника питания. Сначала определялся диапазон излучения с помощью ТГц фильтров фирмы TUDEx. Далее, в качестве анализатора использовался инфракрасный Фурье-спектрометр Vertex 80V фирмы Bruker.

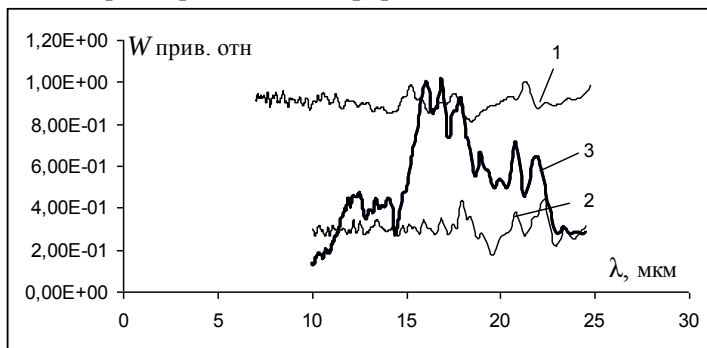


Рис. 2. Спектр излучаемого сигнала (мощность по оси ординат в относительных единицах) в зависимости от интегральной величины тока, протекающего через экспериментальный макет. 1- спектр Глобара; 2 – 82 мА; 3 – 30 мА

На рис.2 приведена спектральная характеристика наблюдаемого в экспериментах излучения. Как и в предыдущих работах авторов, здесь также наблюдается ярко выраженный пороговый эффект по протекаемому через структуру интегральному току. При превышении им значения в 68

мА появляется излучение в диапазоне частот 16-18 ТГц, мощность которого увеличивается с ростом тока. Такая частотная избирательность резко отличается от тепловых спектров (кривые 1,2) в указанном диапазоне и указывает на нетепловой характер излучения.

4. Заключение

Приведённые в работе результаты экспериментов подтвердили «работоспособность» идеи использования нанопроволок в качестве ансамбля основных элементов спин-инжекционных излучателей. Получена устойчивая генерация сигнала в диапазоне 16-18 ТГц. На сегодняшний день это первые экспериментальные результаты и пока трудно точно оценить перспективы использования нанопроволок, по крайней мере, с точки зрения увеличения интегральной мощности излучения терагерцового излучателя. С другой стороны, проведённые исследования вселяют определённый оптимизм и настраивают на продолжение экспериментальных работ в этом направлении.

Список литературы

- [1] Dhillon S.S., Vitiello M.S. et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. 50. P. 1-49.
- [2] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Эпштейн Э.М., Эллиот Р.Дж. Инжекция спинов током в магнитных переходах металл-металл // Радиотехника и электроника. 2003. Т.48. №3. С. 1030-1044.
- [3] Kadigrobov A., Shekhter R.I., Jonson M. // Fisika Nizkikh Temperatur. 2005. Vol.31. P.463.
- [4] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Маликов И.В., Михайлов Г.М., Панас А.И., Чигарёв С.Г., Эпштейн Э.М. Спин-инжекционное терагерцовое излучение в магнитных переходах. // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т.93. С. 289-293.
- [5] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Маликов И.В., Михайлов Г.М., Панас А.И., Чигарёв С.Г., Эпштейн Э.М. Инжекция спинов током и терагерцовое излучение в ферромагнитных переходах // Доклады Академии наук. 2011. Т.438. №1. С.41-43.
- [6] Гуляев Ю.В., Вилков Е.А., Зильберман П.Е., Михайлов Г.М., Черных Ф.В., Чигарев С.Г. Спин-инжекционное стимулированное излучение терагерцовых волн в магнитных переходах // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т.99. № 9-10. С. 591-594.
- [7] Гуляев Ю.В., Вилков Е.А., Зильберман П.Е., Михайлов Г.М., Черных Ф.В., Чигарев С.Г. Стимулированное терагерцовое излучение // Радиотехника и электроника. 2015. Т.60. № 9. С. 963-966.
- [8] Martin C.R. // Science. 1994. Vol. 266. P/ 1961-1966.
- [9] Magnetic Nano- and Microwares: Design, Synthesis, Properties and Applications edited by Manuel Vazques // Elsevier. Amsterdam. Netherlands. 2005. P. 395.
- [10] Давыдов А.Д., Волгин В.М. Темплатное электроосаждение металлов // Электрохимия. 2016. Т. 52. № 9. С. 905-933.

Electrode system for the atomic single-electron transistor

V.R. Gaidamachenko¹, S.A. Dagesyan^{1,2}, E.K. Morozova¹, E.S. Soldatov^{1,2}

¹*Moscow State University n.a.M.V. Lomonosov, г. Москва, 119991, Российская Федерация*

²*The Center for Quantum Technologies of M.V. Lomonosov Moscow State University.
esold@phys.msu.ru*

Abstract: A version of the system of electrodes of a molecular nanotransistor with improved efficiency and reliable isolation of side gates was developed and implemented. The high gate insulation resistance (greater than 1 TΩ) is shown, which ensures the correct mode of measuring the control characteristics of the transistor.

Keywords: single-electron tunneling, molecules, nanolithography, nanostructures, nanotransistor, nanoelectronics, molecular electronics.

Система электродов для атомного одноэлектронного транзистора

В.Р. Гайдамаченко¹, С.А. Дагесян^{1,2}, Е.К. Морозова¹, Е.С. Солдатов^{1,2}

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
г. Москва, 119991, Российская Федерация*

³*Центр квантовых технологий МГУ имени М.В. Ломоносова
esold@phys.msu.ru*

Аннотация: Разработан и реализован вариант системы электродов молекулярного нанотранзистора с повышенной эффективностью и надежной изоляцией боковых затворов. Показано высокое сопротивление изоляции затворов (более 1 ТΩ), обеспечивающее правильный режим измерений характеристик управления транзистора.

Ключевые слова: Одноэлектронное туннелирование, молекулы, нанолитография, наноструктуры, нанотранзистор, нанoeлектроника, молекулярная электроника.

1. Введение

Разрешающая способность современных промышленных нанолитографических систем непрерывно растёт уже более полувека. Ширина канала полевых транзисторов достигла 14 нм [1] и анонсирован выход на норму 10 нм [2] за счет применения новейших технологий [3-6]. Однако при дальнейшей миниатюризации на таких масштабах проявляются размерные квантовые эффекты. Это заставляет искать новые подходы, новые принципы работы устройств, созданных по планарной технологии.

Многообещающим элементом в этой области является атомно-молекулярный одноэлектронный транзистор, представляющий собой систему из одноатомного зарядового центра внутри молекулы, соединенного туннельными переходами предельно малой емкости с электродами истока и стока, в которой происходит коррелированное туннелирование электронов [7,8]. Такие элементы обладают целым рядом уникальных свойств [9] и могут обеспечить создание принципиально новых вариантов различных устройств [10]. Однако, создание надежной технологии изготовления таких наноэлементов является сейчас весьма актуальной и еще не завершенной задачей. Цель настоящей работы – разработать методику создания электродной системы молекулярных одноэлектронных транзисторов и изготовить такую систему.

2. Методика изготовления

Изготовление системы нанoeлектродов молекулярного одноэлектронного транзистора проводилось на кремниевых чипах со стороной 10 мм, покрытых на первом этапе слоем оксида кремния (SiO_2) толщиной 400 нм, нанесенного путем магнетронного напыления в установке Leybold Z-400 в смеси газов кислорода и аргона при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ и $2 \cdot 10^{-3}$ мбар кислорода и аргона соответственно. На следующем шаге методами оптической литографии на чипе формировалась макроскопическая система подводящих проводов (рис. 1). Для этого на него наносился позитивный резист РММА А4 (4 %-й раствор в анизоле), на следующем шаге с помощью кварцевой ультрафиолетовой лампы ДРК-120 область подводящих проводов через фотошаблон в течение 2 минут облучалась излучением с длиной волны 254 нм при интенсивности 26-27 мВ/см². Результатом проявления при комнатной температуре в течение 50 секунд в смеси изопро-

пилового спирта и воды с отношением 7% и 93%, соответственно, являлась система «окон» для будущих подводящих проводов (рис. 1).

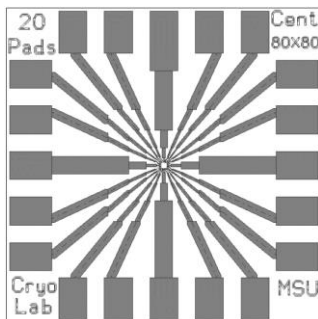


Рис. 1. Общий вид системы электродов на чипе.

Fig. 1. General view of the system of electrodes on a chip.

Затем с помощью электронно-лучевой литографии экспонировалась центральная часть образца (белая область в центре чипа на рис. 1) для формирования системы нанoeлектродов транзистора (рис. 2) с характерным размером в около 40 нм [11], который необходим для получения молекулярного транзистора на основе именно одиночной молекулы. Этот процесс реализовывался в данной работе с помощью электронного микроскопа ZEISS Supra 40 с дополнительным модулем Raith для проведения процесса литографии. После экспонирования и проявления при тех же параметрах, что и после оптической литографии, в образовавшиеся «окна» методом термического напыления в установке Leybold L-560 при давлении не выше, чем 10^{-6} мбар наносилась пленка золота толщиной 18 нм. На последнем шаге в формировании наноструктуры маска из необлученного резиста с лежащим на ней напыленным золотом удалялась путем растворения в ацетоне («взрыв» или «lift-off»). Таким образом удастся создать систему подводящих проводов, управляющих электродов и нанопроводов (рис. 2а, б), которые в дальнейшем разрываются с помощью электромиграции и в получившийся зазор может быть помещена молекула ауофильного производного терпиридина на основе родия $\text{Rh}(\text{tpy}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(\text{O})-(\text{CH}_2)_4-\text{C}_3\text{H}_5\text{S}_2)_2$ с единственным атомарным зарядовым центром [12], что создает возможность сформировать атомный одноэлектронный транзистор.

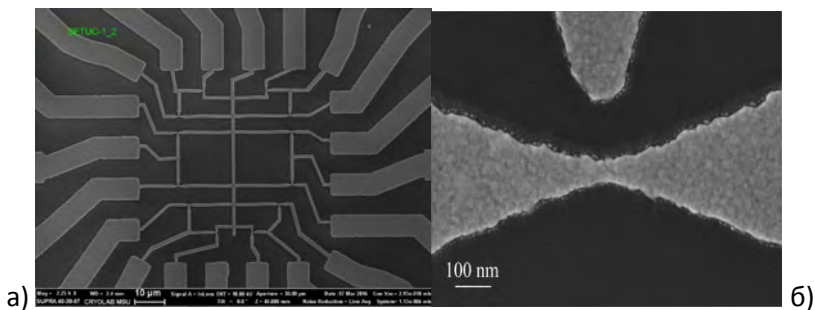


Рис.2. Система нанозлектродов транзистора: а – общий вид системы нанозлектродов транзисторов в центре образца (белое пятно в центре на рис. 1); б - вид нанопровода перед операцией разрыва (наверху – затвор).

Fig. 2. Nanoelectrode system of the transistor: a - general view of the system of nanoelectrodes of transistors in the center of the sample (white spot in the center in Fig. 1); b - the shape of the nanowire before the rupture operation (at the top – the gate)

3. Изоляция электродов затвора

Оценка размера зарядового центра дала значение, существенно меньшее размера молекулы - около 2 нм [13], что требует разработки технологии изготовления транзисторов с максимально приближенными к острову транзистора электродами затвора для увеличения их взаимной емкости. Для этого в данной работе была разработана и реализована с помощью техники «холодного» проявления [14] новая топология электродов транзистора с увеличенным вдвое количеством электродов затвора и с уменьшенным до 100 нм расстоянием между двумя затворами (рис. 3). Такая более плотная упаковка элементов транзистора повышает также требования к изоляции затвора, для удовлетворения которых была разработана методика изоляции электродов управления путем запыления электрода затвора толстым слоем диэлектрика через «окно», созданное прямой литографией в слое позитивного резиста. После описанного выше формирования на подложке полной системы электродов молекулярного одноэлектронного транзистора проводилась еще одна электронно-лучевая литография в позитивном резисте PMMA A2 с «окнами» над электродами затвора, которые надо было предельно аккуратно совместить (с точностью около 20 нм) с уже сформированными электродами затвора. После этого на всю наноструктуру напылялся слой оксида алюминия (Al_2O_3) толщиной 30 нм и удалялись все неэкспонированные участки резиста. В результате полу-

чалась наноструктура, в которой пленка оксида алюминия полностью изолирует затвор, не затрагивая нанопровода (рис. 3).

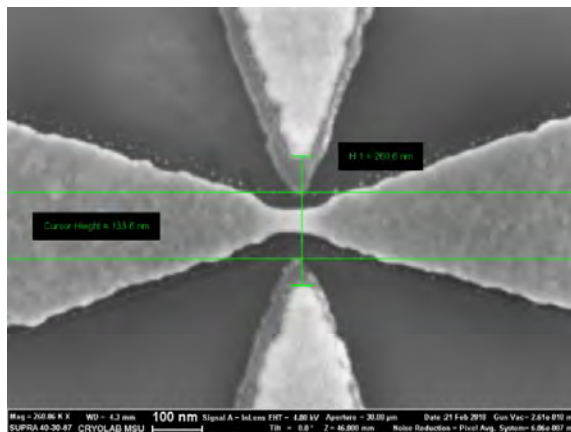


Рис. 3. Типичный вид нанопровода и затворов после «взрыва» маски для формирования изоляции: светлые участки на управляющих электродах – металлическая пленка затвора, «ореол» вокруг затворов – пленка оксида алюминия.

Fig.3. A typical view of the nanowire and closures after the "explosion" of the mask for the formation of insulation: light areas on the control electrodes - metal film of the gate, "aureole" around the gates - aluminum oxide film.

Полученный результат показывает достижение весьма высокой точности совмещения – около 20 нм. Сопротивление полученной изоляции между электродом затвора и транспортным электродом при подаче напряжения до 50 В для всех образцов превышало 1 Том.

4. Заключение

В настоящей работе изготовлены образцы с тонкопленочной системой нанозлектродов, пригодные для формирования нанотранзисторов на основе одиночной молекулы. Разработана и реализована за счет весьма высокой точности совмещения (20 нм) методика приближения боковых электродов затвора на расстояние 50 нм от центра нанопровода и их надежной изоляции с сопротивлением утечки более 1 Том, что показывает пригодность изготовленных наноструктур электродов для эффективного управления коррелированным туннелированием электронов в транзисторе.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа была выполнена при поддержке фонда РФФИ (грант № 18-37-00414).

Список литературы

- [1] Intel Xeon Processor E5-2699 v4 (55M Cache, 2.20 GHz), url: [http://ark.intel.com/products/91317/Intel-Xeon-E5-2699-v4-55M-Cache-2_20-GHz-Processor-](http://ark.intel.com/products/91317/Intel-Xeon-E5-2699-v4-55M-Cache-2_20-GHz-Processor) (дата обр. 2016).
- [2] Courtland R. Moore's law's next step: 10 nanometers //IEEE Spectrum. 2017. V. 54. №. 1. P. 52.
- [3] George S. M. Atomic layer deposition: an overview //Chemical reviews. 2009. V. 110. №. 1. P. 111.
- [4] Kanarik K. J. et al. Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2015. V. 33. №. 2. P. 020802.
- [5] Pirati A. et al. Performance overview and outlook of EUV lithography systems //Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VL– International Society for Optics and Photonics, 2015. V. 9422. P. 94221P.
- [6] Servin I. et al. Ready for multi-beam exposure at 5kV on MAPPER tool: lithographic and process integration performances of advanced resists/stack //Alternative Lithographic Technologies VII. – International Society for Optics and Photonics, 2015. V. 9423. P. 94231C.
- [7] Kiguchi M. Single-molecule Electronics. – Springer, 2016.
- [8] Likharev K. K., Claeson T. Single electronics //Scientific American. 1992. V. 266. №. 6. P. 80.
- [9] Averin D. V. and Likharev K. K. Single-electronics: Correlated transfer of single electrons and Cooper pairs in small tunnel junctions // in Mesoscopic Phenomena in Solids, 1991. V. 30. P. 173.
- [10] Likharev K. K. Single-electron devices and their applications //Proceedings of the IEEE. 1999. V. 87. №. 4. P. 606.
- [11] Boto A. N. et al. Quantum interferometric optical lithography: exploiting entanglement to beat the diffraction limit //Physical Review Letters. 2000. V. 85. №. 13. P. 2733.
- [12] Beloglazkina, E.K., Majouga A.G., Manzheliy E.A., et al. Mononuclear ruthenium(II) and rhodium(III) complexes with S-[4-(2,2':6',2''-terpyridin-4'-yl)phenoxy]butyl ethanethioate and 4'-[4-(1,2-dithiolane-3-yl)butylcarboxy]phenyl]-2,2':6',2''-terpyridine: Synthesis, electrochemistry, antibacterial activity and catalytical application // Polyhedron. 2015. V. 85. P. 800.
- [13] Parshintsev A.A., Shorokhov V.V., Soldatov E.S. Study possibility of building a single-electron transistor based on a molecule with single atom charge center // Bull. Russ. Acad. Sci. Physics. 2017. V. 81. No. 1. P. 38.
- [14] Hu W. et al. Sub-10 nm electron beam lithography using cold development of poly (methylmethacrylate) //J. Vac. Sci. & Tech. B. 2004. V. 22. № 4. P. 1711.

References

- [1] Intel Xeon Processor E5-2699 v4 (55M Cache, 2.20 GHz), url: [http://ark.intel.com/products/91317/Intel-Xeon-E5-2699-v4-55M-Cache-2_20-GHz-Processor-\(дата_обп.2016\).](http://ark.intel.com/products/91317/Intel-Xeon-E5-2699-v4-55M-Cache-2_20-GHz-Processor-(дата_обп.2016).)
- [2] Courtland R. Moore's law's next step: 10 nanometers //IEEE Spectrum. 2017. V. 54. №. 1. P. 52.
- [3] George S. M. Atomic layer deposition: an overview //Chemical reviews. 2009. V. 110. №. 1. P. 111.
- [4] Kanarik K. J. et al. Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2015. V. 33. №. 2. P. 020802.
- [5] Pirati A. et al. Performance overview and outlook of EUV lithography systems //Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VL– International Society for Optics and Photonics, 2015. V. 9422. P. 94221P.
- [6] Servin I. et al. Ready for multi-beam exposure at 5kV on MAPPER tool: lithographic and process integration performances of advanced resists/stack //Alternative Lithographic Technologies VII. – International Society for Optics and Photonics, 2015. V. 9423. P. 94231C.
- [7] Kiguchi M. Single-molecule Electronics. – Springer, 2016.
- [8] Likharev K. K., Claeson T. Single electronics //Scientific American. 1992. V. 266. №. 6. P. 80.
- [9] Averin D. V. and Likharev K. K. Single-electronics: Correlated transfer of single electrons and Cooper pairs in small tunnel junctions // in Mesoscopic Phenomena in Solids, 1991. V. 30. P. 173.
- [10] Likharev K. K. Single-electron devices and their applications //Proceedings of the IEEE. 1999. V. 87. №. 4. P. 606.
- [11] Boto A. N. et al. Quantum interferometric optical lithography: exploiting entanglement to beat the diffraction limit //Physical Review Letters. 2000. V. 85. №. 13. P. 2733.
- [12] Beloglazkina, E.K., Majouga A.G., Manzheliy E.A., et al. Mononuclear ruthenium(II) and rhodium(III) complexes with S-[4-(2,2',6',2''-terpyridin-4'-yl)phenoxy]butyl ethanethioate and 4'-[4-(1,2-dithiolane-3-yl)butylcarboxy]phenyl]-2,2':6',2''-terpyridine: Synthesis, electrochemistry, antibacterial activity and catalytical application // Polyhedron. 2015. V. 85. P. 800.
- [13] Parshintsev A.A., Shorokhov V.V., Soldatov E.S. Study possibility of building a single-electron transistor based on a molecule with single atom charge center // Bull. Russ. Acad. Sci. Physics. 2017. V. 81. No. 1. P. 38.
- [14] Hu W. et al. Sub-10 nm electron beam lithography using cold development of poly (methacrylate) //J. Vac. Sci. & Tech. B. 2004. V. 22. № 4. P. 1711.

Acknowledgements

The work was carried out with the support of the RFBR Foundation (grant No. 18-37-00414).

Electrons drift velocity overshoot in the inverted heterostructures

Pashkovskii A. B., Novikov S. I., Martinov Ya.B., Lukashin V. M.,
Lapin V. G.,

JOINT-STOCK COMPANY «RESEARCH & PRODUCTION CORPORATION
«ISTOK» named after A.I. Shokin»

2a, Vokzalnaya St., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia,
solidstate10@mail.ru

Abstract: The first results of the electrons drift velocity overshoot calculations in various types of transistor heterostructures, including donor – acceptor doping and additional potential barriers, are presented. It is demonstrated that donor – acceptor doping creates conditions even more favorable than heterostructures with deeper quantum wells obtained by increasing the gap of the conduction bands at the heterojunction boundary for the electrons transport under transistor gate.

Keywords: electrons drift velocity overshoot, quantum well, donor-acceptor doping.

Нелокальный разогрев электронов в DA-рНЕМТ гетероструктурах

Пашковский А.Б., Новиков С.И., Мартынов Я.Б., Лукашин В.М.,
Лапин В.Г.

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «ИСТОК» имени А.И.Шокина»

Вокзальная ул., д.2а, корпус 1, комната 65, этаж 2, г.Фрязино, Московская область, Россия, 141190
solidstate10@mail.ru

Аннотация: Представлены первые результаты расчётов всплеска дрейфовой скорости электронов в различных типах транзисторных гетероструктур, в том числе с донорно – акцепторным легированием и дополнительными потенциальными барьерами. Продемонстрировано, что для пролета электронов под затвором транзистора донорно – акцепторное легирование создает условия даже более благоприятные чем гетероструктуры с более глубокими квантовыми ямами, полученными за счет увеличения разрыва зон проводимости на границе гетероперехода.

Ключевые слова: всплеск дрейфовой скорости электронов, квантовая яма, донорно – акцепторное легирование.

1. Введение

Огромный экспериментальный опыт, накопленный за долгие годы, при разработке мощных транзисторов на гетероструктурах с двусторонним легированием канала (DpHEMT) без детальных теоретических исследований позволял успешно проектировать приборы с характеристиками близкими к оптимальным. Ситуация принципиально изменилась с появлением гетероструктур с донорно акцепторным легированием (DA-pHEMT) и транзисторов на их основе [1]. Также интерес к особенностям нелокального разогрева электронов в гетероструктурах подстегнули работы [2,3] и исследования гетероструктур с глубокими квантовыми ямами [4]. Детальное описание физических процессов в таких системах по - видимому требует решения кинетического уравнения или более сложных моделей. Но, немало полезной информации, как показывает опыт [5], можно получить на основе использования достаточно простых моделей.

В данной работе описаны простая феноменологическая модель и результаты ее применения для анализа всплеска дрейфовой скорости электронов в ряде DA-pHEMT структур.

2. Математическая модель

Модель предназначена для анализа нелокального транспорта электронов в транзисторных гетероструктурах с идеализированным (бесконечно длинным) затвором при возможном сильном размерном квантовании в направлении, перпендикулярном поверхности структур. Потенциальный рельеф и уровни размерного квантования для этого направления определяются на основе численного самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. В направлении параллельном гетеропереходу транспорт электронов описывается на основе феноменологической системы уравнений сохранения импульса и энергии аналогичной по форме [5] с временами релаксации для объёмных материалов. В предположении, что частота рассеяния электронов задается в виде: $\nu = \nu_1 p_1 + \nu_2 p_2$, где p_1, p_2 , ν_1, ν_2 соответственно - вероятности нахождения электронов и их частоты рассеяния в узкозонном слое канала и в более широкозонных слоях обрамляющих канал, данная система записывается как:

$$m^*(\varepsilon) = m_1^*(\varepsilon) p_1 + m_2^*(\varepsilon) p_2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(m^*(\varepsilon)V)}{\partial t} = q \left(E - \frac{m^*(\varepsilon)V(m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)E_{s2}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)E_{s1}(\varepsilon)p_1)}{m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)} \right) \quad (3)$$

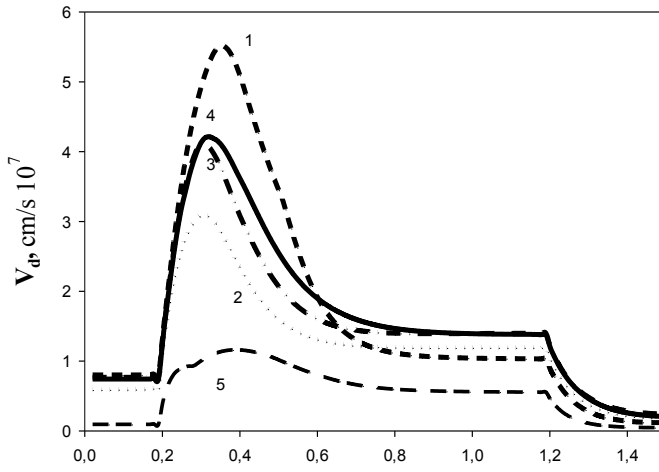
$$V_s(E) = \frac{m_1^*(E)V_{s1}(E)m_2^*(E)V_{s2}(E)}{(m_1^*(E)p_1 + m_2^*(E)p_2)(m_1^*(E)V_{s1}(E)p_2 + m_2^*(E)V_{s2}(E)p_1)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q(EV - V_s(\varepsilon)(E_{s1}(\varepsilon)p_1 + E_{s2}(\varepsilon)p_2)) \quad (5)$$

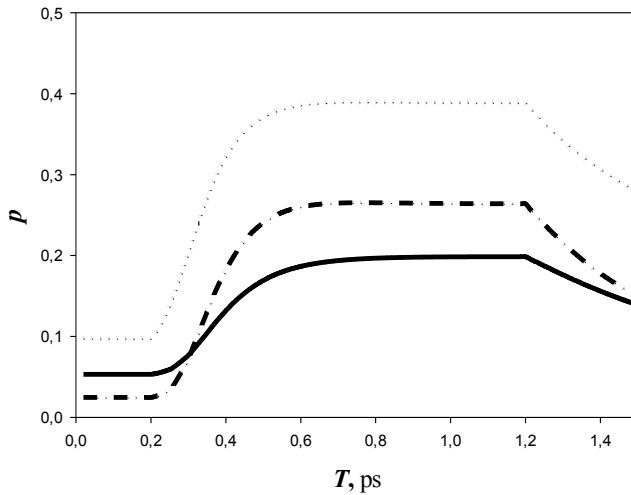
Здесь q , V , m^* , $\varepsilon = 3kT/2$ – заряд, скорость, усредненная эффективная масса и энергия электронов соответственно, E – напряженность электрического поля, $V_{si}(\varepsilon)$, $E_{si}(\varepsilon)$ – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие задаваемой энергии ε , получаемые из расчетов методом Монте-Карло [6] статических характеристик объемных материалов. Естественно, такой подход, не учитывает, эффекты связанные с изменением интенсивности рассеяния за счет возрастания роли размерного квантования. Из-за отсутствия надежных данных использовался упрощенный вариант задания параметров структур. При малом ($<0,2$) содержании In слой канала характеризовался параметрами объемного нелегированного GaAs. Слои, обрамляющие канал, описывались параметрами слоя $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ с величинами разрыва дна зоны проводимости на гетеропереходах 0,3 и 0,5 эВ соответственно для слоев $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ и $\text{In}_{0,2}\text{Al}_{0,8}\text{As}$.

3. Результаты расчётов

На рис.1 представлены результаты отклика дрейфовой скорости и вероятности нахождения электронов в широкозонном материале на подаваемый во времени импульс электрического поля с амплитудой примерно равной средней величине поля под затвором транзистора мм диапазона длин волн. Задавалось, что в течение 0.2 пс электроны движутся в поле с напряжённостью 1 кВ/см, затем подается импульс амплитудой 20 кВ/см с длительностью 1 пс, затем дрейф электронов продолжается в электрическом поле напряженностью 1 кВ/см.



2D Graph 1



б)

Прямоугольная $U_g=0$

Василевский $U_g=0$

Донорно-акцепторная $U_g=0$

Рис. 1. Зависимости дрейфовой скорости электронов (а) и их вероятности нахождения в широкозонном материале (б) от времени. 1 (----) – чистый GaAs, 2 (•••) – гетероструктура $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} - \text{GaAs} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ с двухсторонним легированием, 3 (—•—•—) – гетероструктура $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$, 4 (—) – гетероструктура $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} - \text{GaAs} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ с двухсторонним донорно – акцепторным легированием, 5 (---) – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

Fig. 1. Electrons drift velocity (a) and there localization in wide zone semiconductor probability vs time. 1 (---) – pure GaAs, 2 (•••) – heterostructure $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} - \text{GaAs} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ with double channel doping, 3 (—•—•—) – heterostructure $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$, 4 (——) – heterostructure $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} - \text{GaAs} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ with double donor-acceptor doping, 5 (---) – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

Минимальный всплеск дрейфовой скорости, как и предполагалось ранее, демонстрирует традиционная структура с двухсторонним легированием канала. Связано это с тем, что в такой структуре электроны разогреваясь быстро покидают квантовую яму и оказываются в широкозонном материале см. рис.2 в результате чего в сильном электрическом поле за пределами ямы их оказывается вдвое больше чем в структуре с донорно – акцепторным легированием. В структуре $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{GaAs} - \text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ с большим разрывом зон Δ на границе гетероперехода (0.5 эВ а не 0.3 эВ) всплеск дрейфовой скорости оказывается гораздо больше. Однако, не смотря на это максимальный всплеск дрейфовой скорости электронов демонстрирует структура с донорно – акцепторным легированием..

4. Заключение

Предложена простая математическая модель, позволяющая оценивать всплеск дрейфовой скорости в гетероструктурах с селективным легированием и жесткой локализацией электронов в области канала, основанная на самосогласованном решении уравнений Шредингера, Пуассона и системы феноменологических уравнений сохранения импульса и энергии. Показано, что для пролета электронов под затвором транзистора донорно – акцепторное легирование создает условия даже более благоприятные чем гетероструктуры с более глубокими квантовыми ямами, полученными за счет увеличения разрыва зон проводимости на границе гетероперехода..

Список литературы

- [1] Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. “Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов”// Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 84–89.
- [2] Борисов А.А и др Анализ малосигнальных СВЧ-характеристик DA-pHEMT // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 16. С. 41 – 47.
- [3] Протасов Д.Ю., Гуляев Д.В., Бакаров А.К., Торопов А.И., Ерофеев Е.В., Журавлев К.С. Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в pHEMT-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // Письма в ЖТФ, 2018, том 44, вып. 6 с.77 -84.
- [4] Василевский И.С., Виниченко А.Н., Каргин Н.И. 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетеро-структурной СВЧ-электроники. Мокеровские чтения. Тез. докладов. 24.05.2017. с. 28-29.

[5] M.Shur Influence of Nonuniform Field Distribution on Frequency Limits of GaAs Field-Effect Transistors // Electronics Letters. 1976, V.12, № 23, P.615-616.

[6] A.В.Гарматин Программа моделирования методом Монте-Карло нестационарных процессов разогрева электронов электрическим полем в полупроводниках// Электронная техника Сер.1. Электроника СВЧ, 1985 № 3 (377). С.66

References

[1] V. M. Lukashin, A. B. Pashkovskii, K. S. Zhuravlev, A. I. Toropov, V. G. Lapin, and A. B. Sokolov, Decreasing the Role of Transverse Spatial Electron Transport and Increasing the Output Power of Heterostructure Field_Effect Transistors//Technical Physics Letters, 2012, Vol. 38, No. 9, pp. 819–821.

[2] A. A. Borisov. et.al Studying Average Electron Drift Velocity in pHEMT Structures // Technical Physics Letters, 2016, Vol. 42, No. 8, pp. 848–851.

[3] Protasov, D. Yu., Gulyaev D. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Erofeev E. V., Zhuravlev K. S. Saturated drift velocity of electrons increasing in pHEMT-heterostructures with donor-acceptor doping// Technical Physics Letters, 2018, Vol. 44, вып. No. pp. 77 -84.

[4] Vasilevskiy, I. S., Vinnichenko A. N., Kargin N. I. 8th international scientific conference on physics and technology of nano heterostructures microwave electronics. Makarovskii read. Abstracts. 24.05.2017. P. 28-29.

[5] M.Shur Influence of Nonuniform Field Distribution on Frequency Limits of GaAs Field-Effect Transistors // Electronics Letters. 1976, V.12, № 23, P.615-616.

[6] A.V.Garmatin Monte-Carlo simulation of nonstationary electrons heating by the electric field in semiconductors program// Elektronnaya Tekhnika, Series.1, Elektronika SVCH., 1985 № 3 (377). P.66

Electrons drift velocity overshoot in the inverted heterostructures

Pashkovskii A. B., Novikov S. I., Makovetskaya A.A., Lukashin V. M.,
Lapin V. G.

JOINT-STOCK COMPANY «RESEARCH & PRODUCTION CORPORATION

«ISTOK» named after A.I. Shokin»

2a, Vokzalnaya St., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia,
solidstate10@mail.ru

Abstract: The first results of electrons drift velocity overshoot investigation in reversed heterostructures are presented. It is shown, that the introduction of additional potential barriers due to donor-acceptor doping for such structures fundamentally changes the hot electrons transport under the transistor gate, and the drift velocity overshoot becomes really greater than in traditional metal – AlGaAs – GaAs – AlGaAs structures with double channel doping.

Keywords: electrons drift velocity overshoot, inverted heterostructure, donor-acceptor doping.

Всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных гетероструктурах

Пашковский А.Б., Новиков С.И., Маковецкая А.А., Лукашин В.М.,
Лапин В.Г.

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «ИСТОК» имени А.И.Шокина»

Вокзальная ул., д.2а, корпус 1, комната 65, этаж 2, г.Фрязино, Московская область, Россия, 141190
solidstate10@mail.ru

Аннотация: Представлены первые результаты исследования всплеска дрейфовой скорости электронов в обращенных гетероструктурах. Продemonстрировано, что для таких структур введение дополнительных потенциальных барьеров за счет донорно – акцепторное легирования принципиальным образом меняет транспорт горячих электронов под затвором транзистора, а величина всплеска дрейфовой скорости становится заметно больше чем в традиционных структурах металл – AlGaAs – GaAs – AlGaAs с двусторонним легированием канала.

Ключевые слова: всплеск дрейфовой скорости электронов, обращенная гетероструктура, донорно – акцепторное легирование.

1. Введение

Обращённые гетероструктуры считались одним из крайне перспективных типов структур при разработке первых полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием [1,2]. Их главным её преимуществом считалась возможность значительного увеличения крутизны передаточной характеристики транзистора за счет приближения канала к затвору. Но не смотря на большое количество экспериментов эта ветвь гетероструктурных полевых транзисторов развития не получила. По-видимому, это связано с тем при использовании в полевых транзисторах такая конструкция имеет один существенный недостаток. В ней электроны из слоя канала при разогреве попадают в область по существу ничем не ограниченного по толщине слоя широкозонного материала с высокой интенсивностью рассеяния, что должно приводить к резкому падению подвижности электронов в сильных полях. Однако, эта проблема по аналогии с DA-pHEMT транзисторами может быть достаточно просто решена – путем создания дополнительного *pin* – потенциального барьера ниже слоя канала и вставки широкозонного слоя AlAs, формирующего потенциальный барьер над слоем канала [3]. Поэтому представляет интерес провести простейшие оценки всплеска дрейфовой скорости горячих электронов в обращенных гетероструктурах и хотя бы на качественном уровне сравнить их с традиционными транзисторными псевдоморфными гетероструктурами типа pHEMT.

2. Математическая модель

Для расчётов используем простую феноменологическая модель предназначенную для анализа нелокального разогрева электронов в транзисторных гетероструктурах с идеализированным (бесконечно длинным) затвором. Потенциальный рельеф и уровни размерного квантования для этого направления определяются на основе численного самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. В направлении параллельном гетеропереходу транспорт электронов описывается на основе феноменологической системы уравнений сохранения импульса и энергии аналогичной по форме [4] с временами релаксации для объёмных материалов. В предположении, что частота рассеяния электронов задается в виде: $\nu = \nu_1 p_1 + \nu_2 p_2$, где p_1, p_2, ν_1, ν_2 соответственно - вероятности нахождения

ния электронов и их частоты рассеяния в узкозонном слое канала и в более широкозонных слоях обрамляющих канал, данная система записывается как:

$$m^*(\varepsilon) = m_1^*(\varepsilon) p_1 + m_2^*(\varepsilon) p_2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(m^*(\varepsilon)V)}{\partial t} = q \left(E - \frac{m^*(\varepsilon)V(m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)E_{s2}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)E_{s1}(\varepsilon)p_1)}{m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)} \right) \quad (5)$$

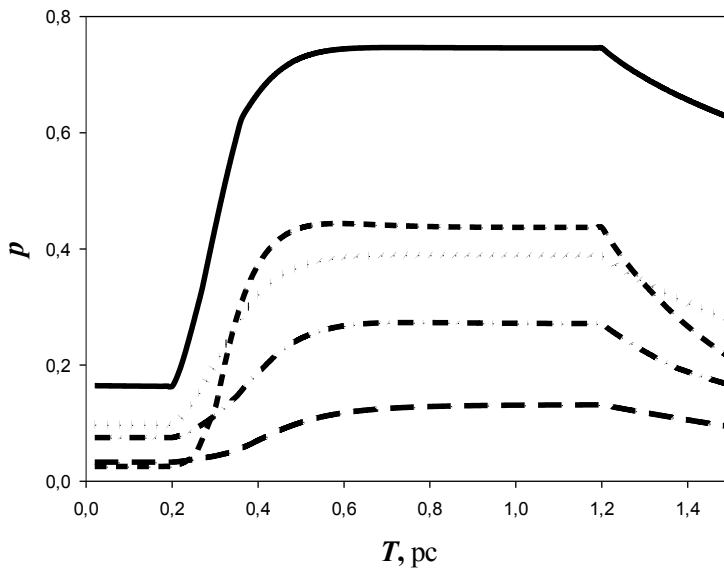
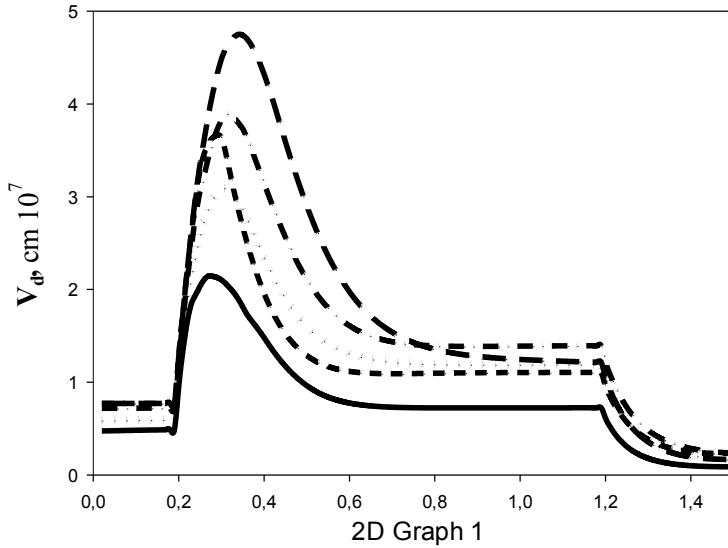
$$V_s(E) = \frac{m_1^*(E)V_{s1}(E)m_2^*(E)V_{s2}(E)}{(m_1^*(E)p_1 + m_2^*(E)p_2)(m_1^*(E)V_{s1}(E)p_2 + m_2^*(E)V_{s2}(E)p_1)} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q(EV - V_s(\varepsilon)(E_{s1}(\varepsilon)p_1 + E_{s2}(\varepsilon)p_2)) \quad (7)$$

Здесь q , V , m^* , $\varepsilon = 3kT/2$ – заряд, скорость, усредненная эффективная масса и энергия электронов соответственно, E – напряженность электрического поля, $V_{si}(\varepsilon)$, $E_{si}(\varepsilon)$ – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие задаваемой энергии ε , получаемые из расчетов методом Монте-Карло [5] статических характеристик объёмных материалов. Естественно, такой подход, не учитывает, эффекты связанные с изменением интенсивности рассеяния за счет возрастания роли размерного квантования. Из-за отсутствия надежных данных использовался упрощенный вариант задания параметров структур. При малом ($<0,2$) содержании In слой канала характеризовался параметрами объёмного нелегированного GaAs. Слои, обрамляющие канал, описывались параметрами слоя $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ с величинами разрыва дна зоны проводимости на гетеропереходах 0,3 и 0,5 эВ соответственно для слоев $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ и $\text{In}_{0,2}\text{Al}_{0,8}\text{As}$.

3. Результаты расчётов

На рис.1 а,б представлены результаты отклика дрейфовой скорости и вероятности нахождения электронов в широкозонном материале на подаваемый во времени импульс электрического поля с амплитудой примерно равной средней величине поля под затвором транзистора мм диапазона длин волн. Задавалось, что в течение 0.2 пс электроны движутся в поле с напряжённостью 1 кВ/см, затем подается импульс амплитудой 20 кВ/см с длительностью 1 пс, затем дрейф электронов продолжается в электрическом поле напряженностью 1 кВ/см.



б)

Рис. 1. Зависимости дрейфовой скорости электронов (а) и их вероятности нахождения в широкозонном материале (б) от времени. Гетероструктуры: (—) GaAs – Al_{0.3}Ga_{0.7}As, (---) In_{0.2}Al_{0.8}As – In_{0.2}Ga_{0.8}As, (•••) Al_{0.3}Ga_{0.7}As – GaAs – Al_{0.3}Ga_{0.7}As с обращенной dNdP Ug = -0.2, (—•—) Al_{0.3}Ga_{0.7}As – GaAs – Al_{0.3}Ga_{0.7}As с обращенной Bac Ug = +0.5, (—•—) Al_{0.3}Ga_{0.7}As – GaAs – Al_{0.3}Ga_{0.7}As с обращенной Bac DnDp Ug = -0.2

двухсторонним легированием, (— • — • —) GaAs – Al_{0.3}Ga_{0.7}As с донорно – акцепторным легированием, (— — —) In_{0.2}Ga_{0.8}As – In_{0.2}Al_{0.8}As с донорно – акцепторным легированием.

Fig. 1. Electrons drift velocity (a) and there localization in wide zone semiconductor probability vs time. Heterostructures (—) GaAs – Al_{0.3}Ga_{0.7}As, (- - -) In_{0.2}Al_{0.8}As – In_{0.2}Ga_{0.8}As, (•••) Al_{0.3}Ga_{0.7}As – GaAs – Al_{0.3}Ga_{0.7}As with double channel doping, (— • — • —) GaAs – Al_{0.3}Ga_{0.7}As with donor-acceptor doping, (— — —) In_{0.2}Ga_{0.8}As – In_{0.2}Al_{0.8}As with donor-acceptor doping.

Видно, что минимальный всплеск дрейфовой скорости наблюдается в обращённой гетероструктуре без дополнительного *pin* – потенциального барьера со стороны подложки. Происходит это из –за того, что в такой структуре около 70% электронов разогреваясь в сильном электрическом поле быстро покидают квантовую яму и оказываются в широкозонном материале см. рис.1б. При внешней схожести ситуаций (и там и там электроны почти свободно уходят в подложку) по величине всплеска обращённая гетероструктура металл –GaAs -AlGaAs оказывается намного хуже, чем обычная псевдоморфная. По сути дела, из-за сильного поперечного пространственного переноса структура металл –GaAs -AlGaAs занимает промежуточное положение между рНЕМТ – структурой и объёмным Al_{0.3}Ga_{0.7}As. Аналогичная картина наблюдается и для структуры металл – In_{0.2}Ga_{0.8}As –In_{0.2}Al_{0.8}As. В этой структуре из –за большего разрыва зон всплеск дрейфовой скорости электронов довольно велик, однако реализуется на очень коротких временах. В обращённой гетероструктуре с дополнительным *pin* – потенциальным барьером со стороны подложки, поперечный пространственный перенос оказывается подавлен, а всплеск дрейфовой скорости оказывается близок к всплеску дрейфовой скорости в DA-рНЕМТ. Крайне эффективным оказывается введение донорно – акцепторного легирования со стороны подложки в структуре металл – In_{0.2}Ga_{0.8}As – In_{0.2}Al_{0.8}As. В этом случае из канала уходит менее 15 % электронов и величина всплеска становится близка к величинам, свойственным объёмному узкозонному материалу.

4. Заключение

Обращённые гетероструктуры с донорно – акцепторным легированием и дополнительным барьером со стороны затвора при сохранении всех своих преимуществ и особенностей – близость канала к затвору (а значит большие значения крутизны), более узкая квантовая яма сужающаяся с повышением напряжения на затворе и как следствие определённое улучшение линейности передаточной характеристики а также большое расстояние между подзонами размерного квантования демонстрируют всплеск дрейфовой скорости электронов близкий к величинам характер-

ным для гетероструктур с двухсторонним донорно – акцепторным легированием.

Список литературы

- [1] А.С. 897062 (СССР). Полевой транзистор. А.С.Тагер, А.А.Кальфа. Приоритет от 0.3.09.1980.
- [2] Кальфа А.А., Тагер А.С. Гетероструктуры с селективным легированием и их применение в полевых транзисторах СВЧ // Электронная Техника Сер.1, Электроника СВЧ, 1980, В. 12(348), С. 26 – 38.
- [3] Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. “Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов”// Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 84–89.
- [4] M.Shur Influence of Nonuniform Field Distribution on Frequency Limits of GaAs Field-Effect Transistors // Electronics Letters. 1976, V.12, № 23, P.615-616.
- [5] А.В.Гарматин Программа моделирования методом Монте-Карло нестационарных процессов разогрева электронов электрическим полем в полупроводниках// Электронная техника Сер.1. Электроника СВЧ, 1985 № 3 (377). С.66

References

- [1] А.С. 897062 (СССР). Field effect transistor A. S. Tager, A. A. Kalfa. Priority of 0.3.09. 1980.
- [2] A. A. Kalfa., A. S. Tager, Selectively doped geterostructures and there FET’s prospects // Elektronnaya Teknika, Series.1, Elektronika SVCH, 1980, B. 12(348), P. 26 – 38.
- [3] V. M. Lukashin, A. B. Pashkovskii, K. S. Zhuravlev, A. I. Toropov, V. G. Lapin, and A. B. Sokolov, Decreasing the Role of Transverse Spatial Electron Transport and Increasing the Output Power of Heterostructure Field_Effect Transistors//Technical Physics Letters, 2012, Vol. 38, No. 9, pp. 819–821.
- [4] M.Shur Influence of Nonuniform Field Distribution on Frequency Limits of GaAs Field-Effect Transistors // Electronics Letters. 1976, V.12, № 23, P.615-616.
- [5] A.V.Garmatin Monte-Carlo simulation of nonstationary electrons heating by the electric field in semiconductors program// Elektronnaya Teknika, Series.1, Elektronika SVCH,, 1985 № 3 (377). P.66

Theoretical study of characteristics of single and dual gate field-effect transistors

Igor I. Abramov, Natali V. Kolomejtseva, Vladimir A. Labunov,
Irina A. Romanova, Irina Y. Shcherbakova
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6, P.Brovki str., Minsk, 220013, Belarus
nanodev@bsuir.edu.by

Abstract: The combined self-consistent model of the graphene field-effect transistors (GFET) on a monolayer graphene is presented in the paper. The algorithms and the software realizing the proposed GFET model and allowing to calculate their electric characteristics depending on geometrical and electrophysical parameters of the investigated device structure, the environment temperature, the applied voltages are developed. A good agreement of simulation results with the known experimental data was carried out that confirmed adequacy of the proposed GFET model.

Keywords: field-effect transistor, monolayer graphene, IV-characteristic, combined model, simulation.

Теоретическое исследование характеристик одно- и двухзатворных полевых графеновых транзисторов

Абрамов И.И., Коломейцева Н.В., Лабунов В.А., Романова И.А.,
Щербакова И.Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь
nanodev@bsuir.edu.by

Аннотация: В докладе описана комбинированная самосогласованная модель полевых графеновых транзисторов (ПГТ) на основе однослойного графена. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение, реализующие предложенную модель ПГТ и позволяющие рассчитывать их электрические характеристики в зависимости от геометрических и электрофизических параметров структуры исследуемого прибора, температуры окружающей среды, внешних прикладываемых смещений. Полученные результаты исследований хорошо согласуются с из-

вестными экспериментальными данными, что подтверждает адекватность предложенной модели ПГТ.

Ключевые слова: полевой транзистор, однослойный графен, вольт-амперная характеристика, комбинированная модель, моделирование.

1. Введение

Вследствие разработки ряда методов получения однослойного графена в последние годы проявляется существенный интерес к практическому использованию графена в нанoeлектронике, в частности к созданию полевых транзисторов на его основе [1]. В связи с этим актуальной задачей является разработка моделей ПГТ и проведение теоретических исследований влияния различных факторов на характеристики данных приборов. В работе приведены комбинированная самосогласованная модель ПГТ на однослойном графене, алгоритмы ее реализации, а также исследования характеристик ПГТ.

2. Комбинированная модель

Модель построена на основе уравнений квантовой диффузионно-дрейфовой модели и относится к классу комбинированных [2]. В докладе рассмотрены блок-схемы алгоритмов реализации предложенной модели ПГТ для моделирования его выходных и передаточных характеристик. Детальное описание процесса моделирования выходных характеристик ПГТ приведено в [3, 4]. В данной работе проведено моделирование передаточных характеристик. При реализации алгоритма передаточных характеристик использован метод дихотомии для учета сопротивлений стока R_d и истока R_s . При расчете передаточных ВАХ ПГТ необходимо находить ток стока I_d при заданном напряжении стока V_d , что является более сложной задачей по сравнению с расчетом выходных вольт-амперных характеристик ПГТ. Проблем не возникает только в случае $R_d = R_s = 0$. В общем, реальном случае, когда R_d и R_s не равны 0, для учета падений напряжений на этих сопротивлениях необходимо перерасчитывать ток стока I_d , чтобы получить приблизительно постоянное и заданное напряжение на стоке V_d , т.е. применять оптимизационный метод (дихотомии). Метод позволяет проводить расчеты с заданной точностью ϵ_{ps} . Достаточным является значение ϵ_{ps} , при котором на графиках отсутствуют искажения (обычно 0,001 В).

3. Результаты моделирования

С помощью предложенной модели и реализующего ее программного обеспечения проведены исследования однозатворного ПГТ 1 и двухзатворного ПГТ 2 на основе однослойного графена. Параметры для моделирования ПГТ 1 даны в [5], ПГТ 2 – в [6].

Расчеты передаточных характеристик (указаны плотности токов) однозатворного ПГТ 1 при различных напряжениях на стоке показаны на рис.1. Кривая 1 соответствует напряжению на стоке $V_d = -0,75$ В, кривая 2 – $V_d = -0,5$ В, кривая 3 – $V_d = -0,1$ В. Полученные результаты качественно неплохо согласуются с известными данными.

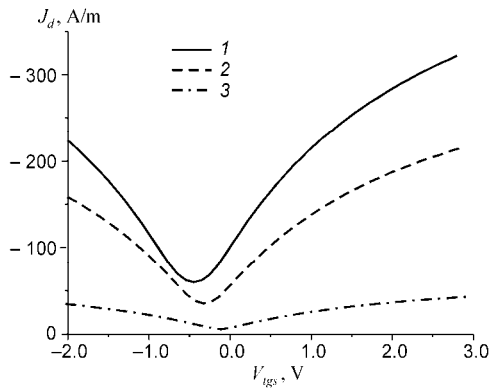


Рис. 1 Передаточные характеристики однозатворного ПГТ 1 при различных напряжениях на стоке: 1 – $V_d = -0,75$ В; 2 – $V_d = -0,5$ В; 3 – $V_d = -0,1$ В.

Fig. 1. Transfer characteristics of single-gate GFET 1 for different values of drain voltage: 1 – $V_d = -0.75$ V; 2 – $V_d = -0.5$ V; 3 – $V_d = -0.1$ V.

Далее проведено моделирование двухзатворного ПГТ 2. На рис. 2 иллюстрируются полученные зависимости плотности тока стока от напряжений на верхнем затворе при фиксированном напряжении на стоке. Кривая 1 соответствует $V_d = 1,5$ В, кривая 2 – $V_d = 1,1$ В, кривая 3 – $V_d = 0,7$ В. Отметим хорошее согласование результатов моделирования с использованием параметров модели $h = 0,1$ м²/В·с, $m = 0,063$ В², $R_d = R_s = 30$ Ом с экспериментальными данными (кривая 4) работы [6] при $V_d = 1,1$ В.

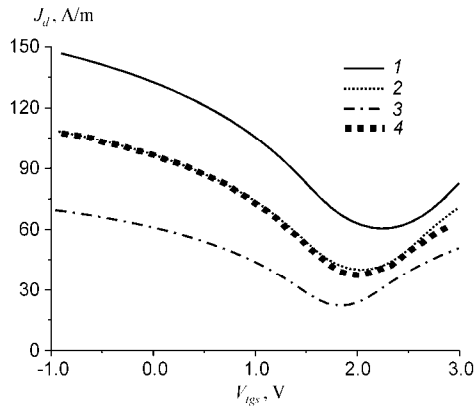


Рис. 2. Передаточные характеристики двухзатворного ПГТ 2 при различных напряжениях на стоке: 1 – $V_d = 1,5$ В, 2 – $V_d = 1,1$ В, 3 – $V_d = 0,7$ В, 4 – экспериментальные данные соответствующие $V_d = 1,1$ В [6].

Fig. 2. Transfer characteristics of dual-gate GFET 2 for different values of drain voltage: 1 – $V_d = 1.5$ V, 2 – $V_d = 1.1$ V, 3 – $V_d = 0.7$ V, 4 – experimental data corresponding to $V_d = 1.1$ V [6].

На рис. 3 показаны передаточные характеристики ПГТ 2 при различных сопротивлениях стока R_d и истока R_s .

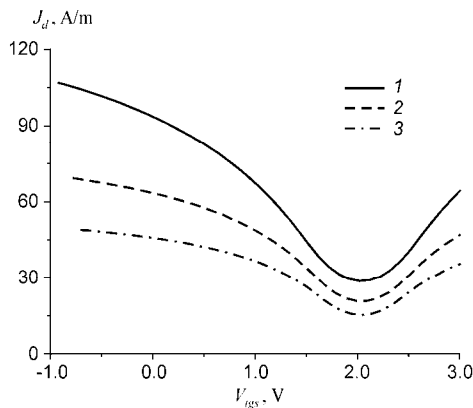


Рис. 3. Передаточные характеристики двухзатворного ПГТ 2 при различных сопротивлениях стока и истока: 1 – $R_d = R_s = 30$ Ом; 2 – $R_d = R_s = 120$ Ом; 3 – $R_d = R_s = 210$ Ом.

Fig. 3. Transfer characteristics of dual-gate GFET 2 for various drain and source resistances: 1 – $R_d = R_s = 30$ Ohm; 2 – $R_d = R_s = 120$ Ohm; 3 – $R_d = R_s = 210$ Ohm.

Расчеты проведены при напряжении на стоке $V_d = 1,1$ В. Отметим, что с увеличением сопротивления ток стока падает. Результаты иллюстрируют важность учета сопротивлений стока R_d и истока R_s при моделировании передаточных вольт-амперных характеристик ПГТ 2. Отметим влияние эмпирического параметра K_1 в алгоритме метода дихотомии. Так, оказалось, что при расчетах передаточных вольт-амперных характеристик ПГТ 2 при сопротивлениях $R_s = R_d > 100$ Ом и $K_1 = 2$ нарушается сходимость метода дихотомии, и в этом случае необходимо задавать его меньшее значение $K_1 = 1$.

4. Заключение

Таким образом, разработана комбинированная модель, а также реализующее ее программное обеспечение, включающее алгоритмы расчетов выходных и передаточных характеристик ПГТ на основе однослойного графена. Программы, реализующие модель, включены в систему моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV [7,8], разрабатываемую в БГУИР с 1995 года.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа подготовлена по результатам исследования, проведенного в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь "Конвергенция".

Список литературы

- [1] Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K.S. et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // *Nanoscale*. 2015. V. 7. P. 4598-4810.
- [2] Абрамов И. И. Основы моделирования элементов микро- и нанoeлектроники, LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2016. 444 с.
- [3] Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Комбинированные модели полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами // *Материалы 27-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*. 2017. Россия. Севастополь. Т. 4. С. 1076-1083.
- [4] Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами // *Нано- и микросистемная техника*. 2017. № 12. С. 714-721.
- [5] Meric I., Dean C., Young A., Hone J., Kim P., Shepard K. L. Graphene field-effect transistors based on boron nitride gate dielectrics // *Proc. IEEE Electron Dev. Meeting*. 2010. pp. 23.2.1-23.2.4.

[6] Wang H., Hsu A., Antoniadis D. A., Palacios T. Compact virtual-source current-voltage model for top- and back-gated graphene field-effect transistors // *IEEE Trans. Electron. Dev.* 2011. V. 58. No. 5. P. 1523-1533.

[7] Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И. Система моделирования наноэлектронных приборов – NANODEV // *Микроэлектроника*. 2003. Т. 32. № 2. С. 124-133.

[8] Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // *Proc. of SPIE*. 2010. V. 7521. P. 75211E1-1-11.

References

[1] Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S. et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, pp. 4598 - 4810.

[2] Abramov I. I. [Bases of micro- and nanoelectronic devices simulation], LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2016, 444 p. (In Russian).

[3] Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. [Combined models of graphene field-effect transistors with the single and dual gates]. *27th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2017)*, Sevastopol: Weber Publishing, 2017, vol. 4, pp. 1076 - 1083. (In Russian).

[4] Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of graphene field-effect transistors with the single and dual gates. *J. of nano- and microsystem technique*, 2017, no. 12, pp. 714 - 721.

[5] Meric I., Dean C., Young A., Hone J., Kim P., Shepard K. L. Graphene field-effect transistors based on boron nitride gate dielectrics. *Proc. IEEE Electron Dev. Meeting*, 2010, pp. 23.2.1 - 23.2.4.

[6] Wang H., Hsu A., Antoniadis D.A., Palacios T. Compact virtual-source current-voltage model for top- and back-gated graphene field-effect transistors. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2011, vol. 58, no. 5, pp. 1523 - 1533.

[7] Abramov I.I., Goncharenko I.A., Ignatenko S.A., Korolev A.V., Novik E.G., Rogachev A. I. NANODEV: a nanoelectronic-device simulation software system. *Russian Microelectronics*, 2003, vol. 32, no. 2, pp. 97 - 104.

[8] Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7521, pp. 75211E1-1 - 11.

Acknowledgements

The paper is based on the research results, which were performed in the framework of the State Programme of Scientific Research of the Republic of Belarus "Convergence".

Theoretical study of the characteristics of graphene-based quantum nanostructures

Igor I. Abramov, Natali V. Kolomejtseva, Vladimir A. Labunov,
Irina A. Romanova, Irina Yu. Shcherbakova
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, 220013, Belarus
nanodev@bsuir.edu.by

Abstract: In the paper the results of IV-characteristics calculations of graphene-based quantum nanostructures on substrates of silicon dioxide and hexagonal boron nitride with the different barrier heights are presented. Simulation was performed with the use of developed combined numerical model based on wave function formalism. The influence of spacer regions on the characteristics of such structures was also investigated.

Keywords: graphene, numerical combined model, Schrödinger equation, resonant tunneling diode, hexagonal boron nitride, silicon dioxide, IV-characteristics.

Теоретическое исследование характеристик квантово-размерных наноструктур на основе графена

Абрамов И.И., Коломейцева Н.В., Лабунов В.А., Романова И.А.,
Щербакowa И.Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь
nanodev@bsuir.edu.by

Аннотация: Проведено моделирование вольт-амперных характеристик квантово-размерных наноструктур на основе графена. Для расчетов использовалась разработанная комбинированная самосогласованная модель, основанная на формализме волновых функций. Получены результаты для двухбарьерных резонансно-туннельных диодов (РТД) на основе двухслойного графена с различной высотой потенциальных барьеров на подложках гексагонального нитрида бора (h-BN) и диоксида кремния (SiO₂). Исследовано также влияние спейсерных областей на характеристики структур.

Ключевые слова: графен, численная комбинированная модель, уравнение Шредингера, резонансно-туннельный диод, гексагональный нитрид бора, диоксид кремния, вольт-амперные характеристики.

1. Введение

Одним из перспективных наноматериалов является графен, в частности, для разработки новых приборных структур нанoeлектроники [1]. Результаты теоретических исследований двух- и трехбарьерных наноструктур на основе графена на подложках SiO_2 и h-BN в зависимости от различных факторов приведены в статьях [2–4]. В данной работе представлены результаты исследования влияния высоты потенциальных барьеров и спейсерных областей на вольт-амперные характеристики (ВАХ) двухбарьерных РТД на основе графена с использованием разработанного инструментария.

2. Комбинированная модель

Для проведения расчетов использовалась разработанная комбинированная модель [2,3] на основе самосогласованного численного решения уравнений Шредингера и Пуассона. В модели выделяются три вида областей: омические контакты, протяженные приконтактные области и активная область. Для исследуемых в работе наноструктур на основе графена к активной области относим потенциальные барьеры, расположенную между ними квантовую яму, а также спейсерные области. В активной области самосогласованно решается система уравнений Шредингера и Пуассона.

3. Результаты моделирования

Структура исследуемого двухбарьерного РТД и энергетическая диаграмма зоны проводимости приведены в работе [3]. Моделирование проводилось для двухбарьерных РТД на основе графена на подложках SiO_2 и h-BN при следующих основных параметрах: ширина квантовой ямы – 3,5 нм, ширины потенциальных барьеров – 1,2 нм, ширины приконтактных областей – 20 нм, температура окружающей среды – 300 К, концентрация примеси в приконтактных областях $N_D = 7,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$. Значения высоты потенциальных барьеров выбирались в диапазоне значений, характерных для рассматриваемых систем материалов графен/ SiO_2 и графен/ h-BN и приводимых в литературе.

На рис.1 представлены результаты исследования влияния высоты потенциальных барьеров Hb на ВАХ (точнее зависимости плотности тока от напряжения) РТД на основе графена на подложке SiO_2 .

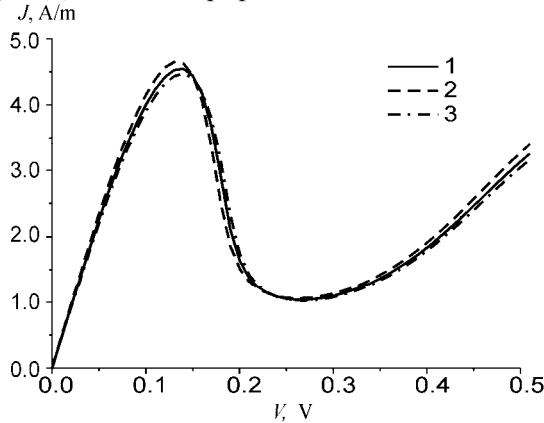


Рис. 1. ВАХ двухбарьерного РТД на основе графена на подложке SiO_2 для различных значений высоты потенциальных барьеров: 1 – $Hb=3,58$ эВ; 2 – $Hb=3,4$ эВ; 3 – $Hb=3,7$ эВ.

Fig. 1. IV-characteristics of double-barrier graphene RTD based on SiO_2 substrate for different barrier heights: 1 – $Hb=3.58$ eV; 2 – $Hb=3.4$ eV; 3 – $Hb=3.7$ eV.

Из рис.1 следует, что увеличение высоты потенциальных барьеров приводит к небольшому уменьшению значений плотностей пиковых токов. В то же время плотности токов долины изменяются несущественно. Аналогичные результаты были получены и для РТД на основе графена на подложке h-BN.

Проведено моделирование двухбарьерных РТД на основе графена на подложке SiO_2 со спейсерными областями из нелегированного графена, непосредственно примыкающими к барьерам слева и справа. На рис.2 приведены результаты моделирования. При моделировании спейсерные области считались принадлежащими активной области прибора и в них самосогласованно решались уравнения Шредингера и Пуассона. Размеры спейсеров задавались равными 9 нм, а высота потенциальных барьеров – 3,58 эВ. Остальные параметра структуры соответствуют приведенным выше. Как следует из рис.2, добавление спейсерных областей приводит к увеличению значений плотностей пиковых токов и более быстрому росту плотностей токов в области высоких прикладываемых напряжений. Это, по-видимому, связано с перераспределением носителей заряда в структуре.

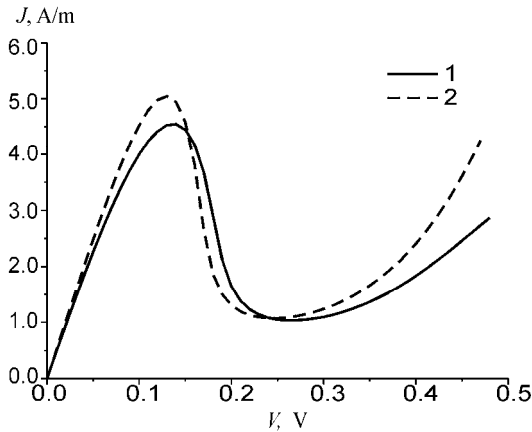


Рис. 2. ВАХ двухбарьерных РТД на основе графена на подложке SiO_2 : 1 – без спейсерных областей, 2 – со спейсерными областями.

Fig. 2. IV-characteristics of double-barrier graphene RTD based on SiO_2 substrate: 1 – without spacer regions, 2 – with spacer regions.

4. Заключение

В докладе проанализировано влияние высоты потенциальных барьеров на ВАХ квантово-размерных наноструктур на основе двухслойного графена на подложках h-BN и SiO_2 . Установлено, что увеличение высоты потенциальных барьеров приводит к уменьшению значений плотностей пиковых токов. Проведено моделирование наноструктур на основе графена со спейсерными областями и показано их существенное влияние на ВАХ. Разработанные программы включены в систему моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV [5,6].

Источники финансирования и выражение признательности

Данные исследования проведены в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» («Нанотех»).

Список литературы

[1] Ferrari A.C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K.S., et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // *Nanoscale*. 2015. V. 7. No. 11. P. 4598–4810.

[2] Абрамов И.И., Коломейцева Н.В., Лабунов В.А., Романова И.А. Моделирование резонансно-туннельных диодов на основе графена на подложках различного типа // *Нано- и микросистемная техника*. 2015. № 11. С. 3–10.

[3] Абрамов И.И., Коломейцева Н.В., Лабунов В.А., Романова И.А. Моделирование резонансно-туннельных приборных структур на основе углеродных наноматериалов // *Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век*. 2017. Т. 3. С. 3–11.

[4] Abramov I.I., Labunov V.A., Kolomejtseva N.V., Romanova I.A. Simulation of devices based on carbon nanotubes and graphene // *Proc. of SPIE*. 2014. V. 9440. P. 944017–1–10.

[5] Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И. Система моделирования наноэлектронных приборов – NANODEV // *Микроэлектроника*. 2003. Т. 32. № 2. С. 124–133.

[6] Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // *Proc. of SPIE*. 2010. V. 7521. P. 75211E1–1–11.

References

[1] Ferrari A.C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K.S., et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, no. 11, pp. 4598–4810.

[2] Abramov I.I., Kolomejtseva N.V., Labunov V.A., Romanova I.A. [Simulation of graphene resonant tunneling diodes on the substrates of various types]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no 11. pp. 3–10. (In Russian).

[3] Abramov I.I., Kolomejtseva N.V., Labunov V.A., Romanova I.A. [Simulation of resonant tunneling devices based on carbon nanomaterials]. *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye — XXI vek*, 2017, vol.3, pp. 3–11. (In Russian).

[4] Abramov I.I., Labunov V.A., Kolomejtseva N.V., Romanova I.A. Simulation of devices based on carbon nanotubes and graphene. *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9440, pp. 944017–1–10.

[5] Abramov I.I., Goncharenko I.A., Ignatenko S.A., Korolev A.V., Novik E.G., Rogachev A. I. NANODEV: a nanoelectronic-device simulation software system. *Russian Microelectronics*, 2003, vol. 32, no. 2, pp. 97–104.

[6] Abramov I.I., Baranoff A.L., Goncharenko I.A., Kolomejtseva N.V., Bely Y.L., Shcherbakova I.Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7521, pp. 75211E–1–11.

Acknowledgements

The paper is based on the research results, which was performed in the framework of the State Programme of Scientific Research of the Republic of Belarus “Functional and composite materials, nanomaterials” (“Nanotech”).

Model of diffraction of electromagnetic radiation on nanometer conductive films

¹Glumova M.V., ²Nalogin A.G., ¹Taran E.P., ¹Zuev S.A.

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University
Simferopol, 295007, Russian Federation
taran_evgeniy@mail.ru

²JSC "RPC "Istok" named after Shokin"
Fryazino, 141190, Russian Federation

Abstract: In this paper are the main provisions of the numerical model of diffraction electromagnetic radiation of millimetric and centimetre ranges on nanoscale metal-dielectric structures (MDS) of 50-100 thick films nm. When building the model used by the method of minimal autonomous units. Scattering matrix obtained metal-dielectric structures with nanometer conductive film. The coefficients of standing wave and attenuation in approaching of basic type of wave are certain for a rectangular waveguide.

Keywords: nanometer conducting films, method of minimal autonomous units, coefficients of standing wave, attenuation, adaptive spatial grid

Модель дифракции электромагнитного излучения на нанометровых проводящих пленках

¹Глумова М.В., ²Налогин А.Г., ¹Таран Е.П., ¹Зуев С.А.

¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
taran_evgeniy@mail.ru

²АО «НПП «Исток» им. Шокина»
Фрязино, 141190, Россия

Аннотация: В работе приводятся основные положения численной модели дифракции электромагнитного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов на нанометровых пленках металлodieлектрических структур (МДС) толщиной 50-100 нм. При построении модели использовался метод минимальных автономных блоков. Получена матрица рассеяния МДС с нанометровой проводящей пленкой. Определены коэффициенты стоячей волны и ослабления в приближении основного типа волны для прямоугольного волновода.

Ключевые слова: нанометровые проводящие пленки, метод минимальных автономных блоков, коэффициент стоячей волны, ослабление, адаптивная пространственная сетка.

1. Введение

Воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ диапазона на нанометровые проводящие пленки (НПП) металлodieлектрических структур (МДС) представляет собой, прежде всего, задачу дифракции электромагнитного поля на данных структурах. С точки зрения электродинамики воздействие ЭМИ СВЧ на НПП МДС – это отклик объекта на падающую электромагнитную волну. В результате воздействия ЭМИ на НПП образуются отраженная, прошедшая и поглощенная волны. Соотношения между волнами будут определяться, прежде всего, электрофизическими и геометрическими параметрами проводящей пленки: электропроводностью, толщиной, площадью сечения.

Для построения численной модели, позволяющей рассчитать распределение между мощностями, применяется метод минимальных автономных блоков (МAB), построенный с использованием минимального базиса – в спектре собственных волн присутствуют две однородные Т-волны с ортогональными поляризациями.

2. Численная модель дифракции электромагнитного излучения на нанометровых проводящих пленках МДС в волноводе

Расчет полей вблизи НПП МДС в волноводе (рис.1) рассматривается как решение задачи волноводной дифракции - определение вклада различных типов волн вблизи неоднородности (НПП МДС) для удовлетворения граничных условий на металлodieлектрической структуре и стенках волновода [1]. Вклад различных типов волн определяется матрицей рассеяния S:

$$C^- = S \cdot C^+ \quad (1),$$

где C^- - вектор «отклика» НПП на воздействующее электромагнитное поле, который определяет отраженные и прошедшие волны; C^+ - вектор падающих волн, S - матрица рассеяния.

В декомпозиционном методе прямоугольный волновод с НПП МДС разбивается на автономные блоки (AB) в виде прямоугольных параллелепипедов (рис.2), каждый из которых описывается своей матрицей рассеяния. Матрица рассеяния AB определяется путем решения краевой

задачи на основе уравнений Максвелла с учетом условия излучения волн от НПП МЛС с использованием метода МАБ [2].

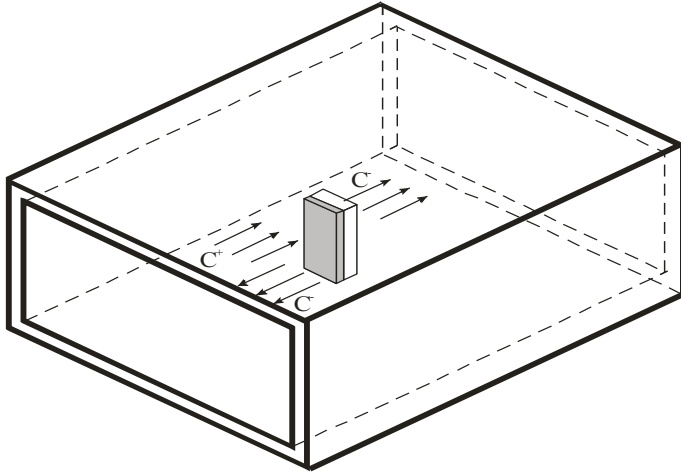


Рис.1. Вектора падающей волны и «отклика» НПП на воздействующее электромагнитное поле.

Fig.1. The vector of the incident wave and the "response" of the nanometer conductive film to the influencing electromagnetic field

Каждый минимальный автономный блок представляется в виде матрицы рассеяния, которая определяется исходя из электрофизических параметров автономного блока. Общая матрица рассеяния прямоугольного волновода с НПП МДС строится с использованием автономных блоков, блоков «короткого замыкания» (описывают отклик проводящих элементов на падающую электромагнитную волну) и блоков перехода, предназначенных для согласования автономных блоков с различными электрофизическими параметрами. Декомпозиционная модель НПП МДС в прямоугольном волноводе представлена на рис.3.

Матрица блоков «короткого замыкания» имеет следующий вид:

$$S_{\text{к.з.}} = \begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где R – коэффициент отражения, значение которого определяется проводимостью пленки:

$$R = \frac{(1+i)\sqrt{\omega\epsilon_0/2\sigma} - 1}{(1+i)\sqrt{\omega\epsilon_0/2\sigma} + 1}, \quad (3)$$

где σ - электропроводность проводящей пленки, ω - частота падающей волны.

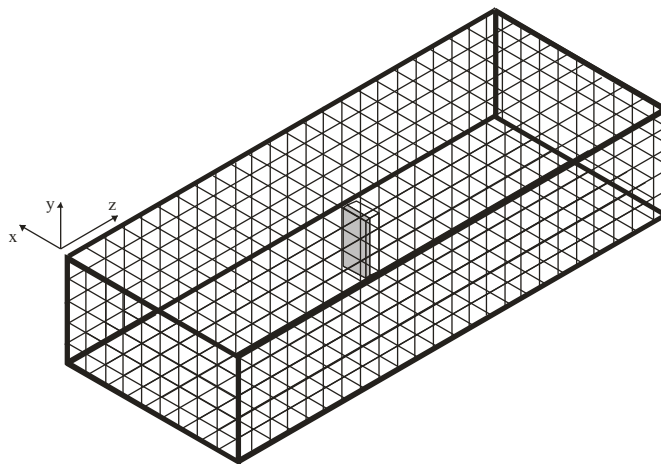


Рис.2. Система автономных блоков для прямоугольного волновода с НПП.

Fig.2. A system of autonomous blocks for a rectangular waveguide with a nanometer conductive film.

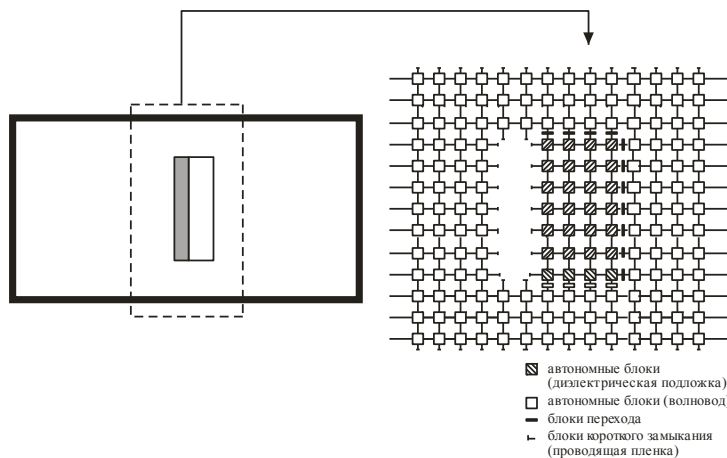


Рис.3. Декомпозиционная модель НПП в волноводе

Fig.3. Decomposition model of a nanometer conductive film in a waveguide

Для определения общей матрицы рассеяния прямоугольного волновода с НПП МДС используется операция рекомпозиции -

объединения матриц однородных автономных блоков, матриц «короткого замыкания» и матриц блоков перехода. Для расчета коэффициента стоячей волны (КСВ) и ослабления A строится общая матрица рассеяния для дальней зоне, в которой существует только основной тип волны прямоугольного волновода (H_{10}):

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

С учетом коэффициентов матрицы рассеяния (S_{11} – коэффициент отражения, S_{12} – коэффициент прохождения), были получены расчетные выражения для КСВ и ослабления A :

$$КСВ = \frac{1 + \sqrt{S_{11}}}{1 - \sqrt{S_{11}}} \quad (5),$$

$$A = -10 \cdot \lg(S_{12}) \quad (6).$$

3. Результаты численного моделирования

На основании численной модели были проведены расчеты КСВ и ослабления для волновода с НПП МДС в частотном диапазоне 3...5 ГГц. На рис. 4,5 приведены распределения КСВ и ослабления (A) в заданном частотном диапазоне.

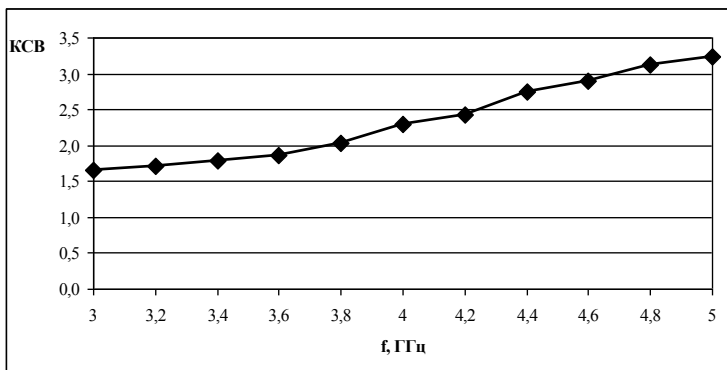


Рис.4. Зависимость КСВ от частоты для прямоугольного волновода с неоднородным включением.

Fig.4. Dependence of standing wave ratio (SWR) on frequency for a rectangular waveguide with an inhomogeneous inclusion

Полученные зависимости качественно согласуются с результатами экспериментов. Количественные отклонения полученных расчетных значений составляют порядка 10-15 %. Такая погрешность обусловлена точностью расчета при проведении численных экспериментов. Для частоты 3 ГГц был произведен расчет КСВ и ослабления при использовании более мелкой пространственной сетки. В частности, количество разбиений прямоугольного волновода в сечении было 500x500, а количество разбиений МДС в сечении – 200x200. В этом случае отклонения численных расчетов от экспериментальных данных составляют не более 5 %.

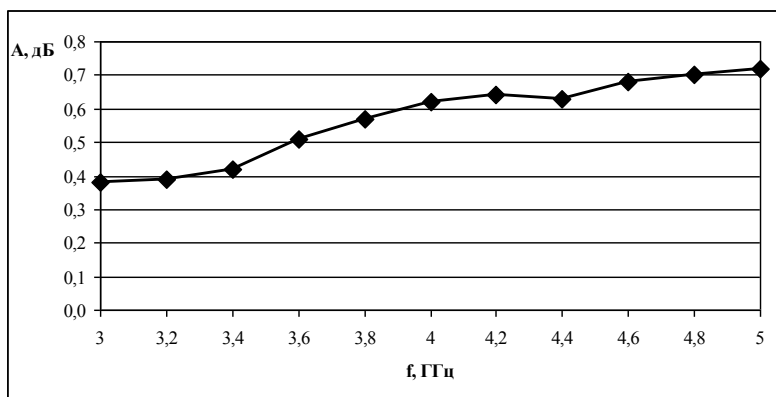


Рис.5. Зависимость ослабления от частоты для прямоугольного волновода с неоднородным включением.

Fig.5. Dependence of attenuation on frequency for a rectangular waveguide with an inhomogeneous inclusion.

Анализ полученных результатов показывает, что при толщине проводящей пленки более 100 нм практически не наблюдается зависимость КСВ и ослабления от частоты. Таким образом, для данной толщины проводящей пленки в выбранном частотном интервале не наблюдаются резонансные явления.

4. Заключение

Рассмотрена численная модель дифракции электромагнитного поля на нанометровых проводящих пленках в волноводе, построенная с использованием метода минимальных автономных блоков. Получены значения КСВ и ослабления для прямоугольного волновода с неоднородным

включением в виде двухслойной структуры (нанометровая пленка на диэлектрической подложке).

Источники финансирования

Доклад подготовлен в рамках работ, выполняемых в соответствии с государственным заданием 2.3129.2017/4.6 «Поисковые исследования в области перспективных инфокоммуникационных технологий с использованием методов теоретической физики»

Список литературы

- [1] Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. - М.: Наука, 1989. – 288 с.
- [2] Никольский В.В., Никольская Т.И. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М.: Наука, 1983 – 304с.

References

- [1] Nikolskii V.V., Nikolskaya T.I. *Electrodynamics and radio wave propagation*. M.: Nauka, 1989. 544 p. (In Russian).
- [2] Nikolskii V.V., Nikolskaya T.I. *Decomposition approach to the problems of electrodynamics*. M.: Nauka, 1983. 304 p. (In Russian).

Acknowledgements

The report was prepared in the framework of the work carried out in accordance with the state task 2.3129.2017/4.6 "Exploratory research in advanced information and communication technologies using methods of theoretical physics»

Simulation of quantum mechanical effects in nanoscale MISFETs

Borovik A.M.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, 220013, Republic of Belarus
borovik@bsuir.by*

Abstract: Features of quantum confinement effect appearance in nanoscale MIS structures are investigated. Comparison of different approaches intended to take into account of quantum mechanical effects in the nanoscale MISFETs simulation is presented. A method for Bohm quantum potential model correction based on results of simulation using the Schrodinger equation for nanoscale MISFETs is proposed.

Keywords: nanoscale MIS structure, device simulation, quantum confinement effect, model correction method, quantum mechanical correction.

Моделирование квантово-механических эффектов в наноразмерных МДП-транзисторах

Боровик А.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, 220013, Республика Беларусь
borovik@bsuir.by*

Аннотация: Исследованы закономерности проявления эффекта квантового ограничения в наноразмерных МДП-структурах. Представлено сравнение различных подходов для учета квантово-механических эффектов при моделировании наноразмерных МДП-транзисторов. Предложен метод коррекции модели квантового потенциала Бома на основе результатов моделирования с использованием уравнения Шредингера для наноразмерных МДП-транзисторов.

Ключевые слова: наноразмерная МДП-структура, приборное моделирование, эффект квантового ограничения, метод коррекции модели, квантово-механическая коррекция.

1. Введение

Непрерывное уменьшение геометрических размеров элементов ИМС, применение новых конструктивных решений (многозатворных

структур, тонких обедненных полупроводниковых слоев) и материалов (соединений элементов III-V групп, графена, дихалькогенидов переходных металлов) при их производстве сопровождается появлением новых физических эффектов (квантовое ограничение, усиление поверхностных и контактных эффектов и др.) и механизмов транспорта носителей заряда (туннелирование, баллистический транспорт) в наноразмерных приборных структурах [1]. Таким образом, актуальной является задача создания новых и адаптации уже существующих приборно-технологических и электрических моделей с учетом особенностей переноса носителей заряда в наноразмерных приборных структурах.

2. Результаты моделирования эффекта квантового ограничения в наноразмерных МДП-транзисторах с КНИ-структурой

Для эффективного управления каналом наноразмерного МДП-транзистора толщина подзатворного диэлектрика должна составлять несколько нанометров, а концентрация примеси в подложке МДП-транзистора стандартной конструкции должна быть увеличена. Но это уменьшает толщину области пространственного заряда и одновременно увеличивает напряженность электрического поля у поверхности. В МДП-транзисторах с ультратонким активным слоем кремния на изоляторе величина области пространственного заряда определяется нанометровой толщиной отсеченного слоя кремния. Поэтому потенциальная яма для электронов становится настолько узкой, что пренебречь квантово-механической природой электронного газа уже нельзя. Ввиду малой ширины квантового колодца в нем формируется двухмерный электронный газ и наблюдается эффект квантового ограничения. Конечное ненулевое минимальное значение энергии электронов и дискретность разрешенных энергетических состояний в низкоразмерной структуре, возникающие как следствие квантово-волнового поведения электрона в замкнутом пространстве, составляет суть эффекта квантового ограничения [2]. Следствием квантового ограничения является существенное уменьшение плотности электронных состояний в квантовом колодце и соответственно концентрации носителей заряда в инверсном слое, смещение порогового напряжения, уменьшение величины удельной емкости подзатворного диэлектрика и увеличение его эффективной толщины [2-5].

С целью исследования эффективности использования для моделирования наноразмерных МДП-структур подходов и моделей, доступных в рамках современных программных комплексов приборно-

технологического моделирования, рассматривался набор МДП-транзисторов с полностью обедненным слоем кремния на изоляторе (Fully depleted SOI MOSFET), имеющих различную толщину слоя кремния (от 1,6 нм до 46 нм) и подзатворного диэлектрика (от 2 нм до 26 нм) [6, 7].

Для определения степени проявления эффекта квантового ограничения и оценки эффективности использования различных моделей проведено моделирование вольт-фарадных характеристик МДП-структур с различной толщиной слоя кремния на изоляторе и подзатворного диэлектрика. Моделирование вольт-фарадных характеристик осуществлялось посредством применения программного комплекса компании Silvaco с использованием стандартной диффузионно-дрейфовой модели, диффузионно-дрейфовой модели с коррекцией квантовым потенциалом Бома и модели на основе уравнение Шредингера [8].

На рис. 1 представлены результаты моделирования распределения электронов в слое кремния при использовании классического и квантовомеханического подходов. Снижение концентрации электронов P_e на границе раздела Si-SiO₂, наблюдаемое при использовании квантовомеханического подхода, является следствием квантового ограничения и соответствующих изменений плотности состояний в инверсном слое.

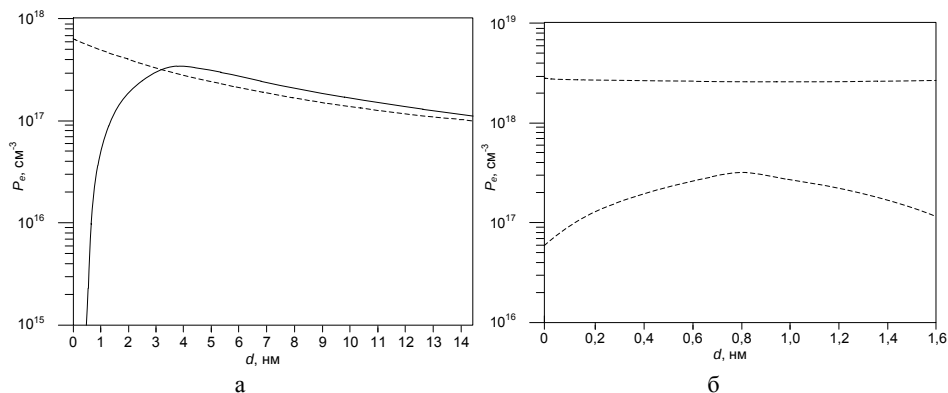


Рис. 1. Результаты моделирования распределения электронов в слоях кремния толщиной 46 нм (а) и 1,6 нм (б)

(пунктирная линия соответствует классическому подходу, сплошная — квантовомеханическому с использованием уравнения Шредингера).

Fig. 1. Results of electron distribution simulation in silicon layers with 46 nm and 1.6 nm thickness

(the dotted line corresponds to the classical approach, solid - to the quantum mechanical approach using the Schrodinger equation)

Рис. 2 демонстрирует влияние толщины активного слоя кремния t на взаимное смещение вдоль оси напряжений вольт-фарадных характеристик МДП-структур, полученных с использованием классической диффузионно-дрейфовой модели ($Vddm$) и диффузионно-дрейфовой модели с коррекцией квантовым потенциалом Бома ($Vbqp$), по отношению к характеристикам, полученным с использованием уравнения Шредингера ($Vschro$). Толщина подзатворного диэлектрика при этом составляла 26 нм. На рис. 3 представлена зависимость максимального относительного отклонения δ результатов моделирования вольт-фарадных характеристик, полученных с использованием различных моделей, от толщины оксида t_{ox} . Моделирование при этом осуществлялось для МДП-структур с толщиной слоя кремния 46 нм. Наблюдаемые зависимости являются следствием изменений спектра разрешенных энергетических состояний и плотности состояний в инверсном слое, отражают уменьшение величины удельной емкости подзатворного диэлектрика и увеличение его эффективной толщины, объясняют смещение порогового напряжения и снижение величины тока МДП-транзисторов.

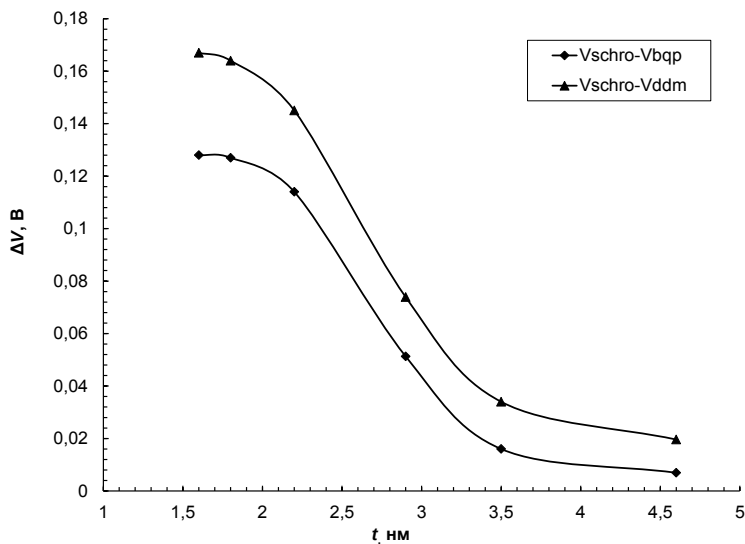


Рис. 2. Зависимость взаимного смещения вольт-фарадных характеристик МДП-структур, полученных с использованием различных подходов, от толщины слоя кремния

Fig. 2. Dependence of the relative displacement of the MIS structures capacitance-voltage characteristics obtained using different approaches on the silicon layer thickness

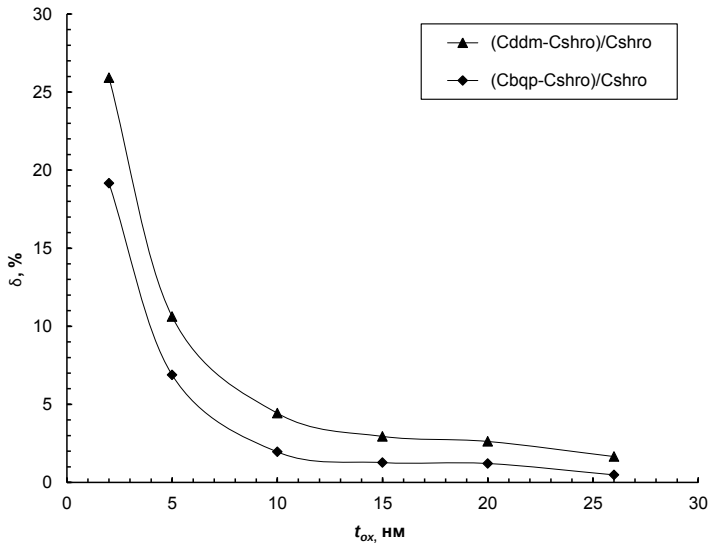


Рис. 3. Зависимость максимального относительного отклонения вольт-фарадных характеристик, полученных с использованием различных моделей, от толщины оксида

Fig. 3. Dependence of the maximum relative deviation of the capacitance-voltage characteristics obtained using different models on the oxide thickness

3. Результаты коррекции модели квантового потенциала Бома

Несмотря на все достоинства подхода, основанного на непосредственном квантово-механическом, с использованием уравнения Шредингера, описании физических процессов в приборной структуре, отсутствие надежности используемых численных методов, высокие требования к вычислительным ресурсам и «простоте» приборной структуры зачастую делают невозможным его применение при моделировании процессов переноса носителей заряда. В этом случае необходим переход к использованию подхода на основе квантово-механической коррекции базовой (например, диффузионно-дрейфовой) модели. Следует отметить, что, хотя коррекция квантовым потенциалом Бома и способствует повышению точности и адекватности моделирования, существует необходимость в адаптации соответствующей модели с использованием результатов более точного моделирования на основе уравнения Шредингера. В связи с этим предложен и протестирован метод коррекции модели, определяющей квантовый потенциал Бома, на основе результатов моделирования с использованием уравнения Шредингера путем варьирования значениями

эмпирических коэффициентов модели (рис. 4). Это оказывается возможным, поскольку при моделировании вольт-фарадных характеристик большинство указанных ранее недостатков подхода, основанного на использовании уравнения Шредингера, не наблюдается.

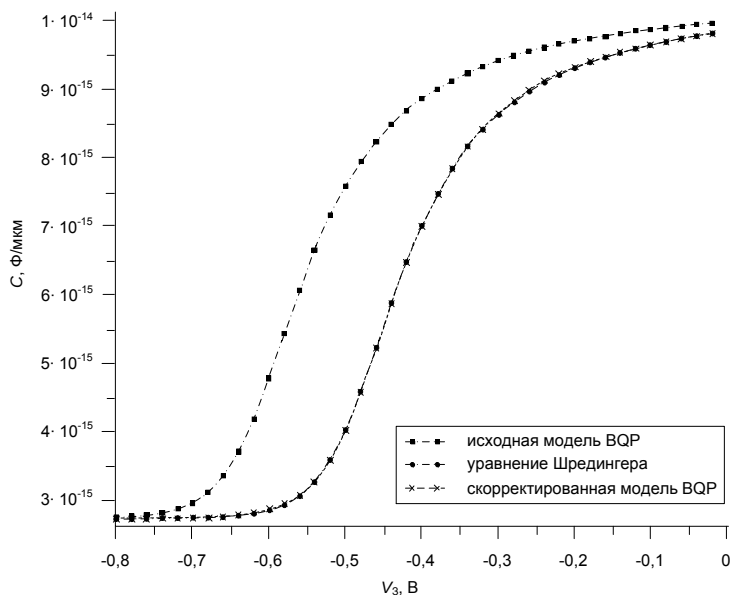


Рис. 4. Результаты коррекции модели, определяющей величину квантового потенциала Бома, для МДП-транзистора с толщиной слоя кремния 1,6 нм

Fig. 4. Results of correction of the model determining the Bohm quantum potential for MISFET with silicon layer thickness of 1.6 nm

4. Заключение

Очевидно, что при достижении активными слоями приборных структур размеров, измеряемых единицами нанометров, степень проявления квантовых эффектов нелинейно возрастает с уменьшением толщины активного слоя. Таким образом, при моделировании МДП-транзисторов с толщиной активного слоя кремния в несколько нанометров или толщиной подзатворного диэлектрика до 5 нм учет квантовых эффектов является обязательным. С целью обеспечения возможности адекватного моделирования наноразмерных МДП-транзисторов предложен метод коррекции модели, определяющей величину квантового потенциала Бома, на основе результатов моделирования с использованием уравнения Шредингера.

Источники финансирования и выражение признательности

Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований РБ «Конвергенция» (задание 3.02).

Список литературы

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS): [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itrs2.net/itrs-reports.html>. – Дата доступа: 10.07.2018.
- [2] Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Данилюк А.Л., Уткина Е.А. Нанoeлектроника: теория и практика. М.: Бином, 2013. 366 с.
- [3] Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 800 с.
- [4] Драгунов В., Неизвестный И., Гридчин В. Основы нанoeлектроники: учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 2000. 332 с.
- [5] Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для Spice в микро- и нанoeлектронике. М.: Физматлит, 2010. 408 с.
- [6] Ciprut A., Chelly A., Karsenty A. Usage and Limitation of Standard Mobility Models for TCAD Simulation of Nanoscaled FD-SOI MOSFETs // Active and Passive Electronic Components. 2015. 9 p.
- [7] Karsenty A., Chelly A. Modeling of the channel thickness influence on electrical characteristics and series resistance in gate-recessed nanoscale SOI MOSFETs // Active and Passive Electronic Components. 2013. 10 p.
- [8] ATLAS User's Manual. Device simulation software [Электронные ресурсы] / Silvaco International. – Режим доступа: [atlas_users.pdf](#).

References

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS): [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.itrs2.net/itrs-reports.html>. – Access Date: 10.07.2018.
- [2] Borisenko V.E., Vorob'eva A.I., Daniljuk A.L., Utkina E.A. Nanoelectronics: theory and practice. M.: Binom, 2013. 366 p. (In Russian).
- [3] Krasnikov G. Ja. Design and technological features of submicron MOSFETs. M.: Tehnosfera, 2011. 800 p. (In Russian).
- [4] Dragunov V., Neizvestnyj I., Gridchin V. Fundamentals of nanoelectronics: textbook. Novosibirsk: NSTU, 2000. 332 p. (In Russian).
- [5] Denisenko V. V. Compact models of MOSFETs for Spice in micro- and nanoelectronics. M.: Fizmatlit, 2010. 408 p. (In Russian).
- [6] Ciprut A., Chelly A., Karsenty A. Usage and Limitation of Standard Mobility Models for TCAD Simulation of Nanoscaled FD-SOI MOSFETs // Active and Passive Electronic Components. 2015. 9 p.
- [7] Karsenty A., Chelly A. Modeling of the channel thickness influence on electrical characteristics and series resistance in gate-recessed nanoscale SOI MOSFETs // Active and Passive Electronic Components. 2013. 10 p.
- [8] ATLAS User's Manual. Device simulation software [Electronic resource] / Silvaco International. – Access mode: [atlas_users.pdf](#).

Acknowledgements

The researches are carried out with the financial support and within the framework of the objectives of state research program Republic of Belarus "Convergence" (task 3.02).

Supramolecular organization and physicochemical properties of thin-film photoconducting elements based on phthalocyanine derivatives

^{1,2,3}Kazak A.V., ¹Usoltseva N.V., ¹Smirnova A.I., ^{2,4}Marchenkova M.A.,
²Bodnarchuk V.V., ²Yablonskii S.V., ⁵Kholodkov I.V.

¹ Nanomaterials Research Institute, Ivanovo State University
 Ermak St. 39, Ivanovo, 153025, Russia
 alexkazak86@gmail.com

² Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Center
 "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences
 Leninskii Pr. 59, Moscow, 119333, Russia
 alexkazak86@gmail.com

³ Moscow Region State University
 Very Voloshinoy St., 24, Mytishi, 141014, Russia
 alexkazak86@gmail.com

⁴ National Research Center "Kurchatov Institute"
 Academician Kurchatov Sq. 1, Moscow, 123182, Russia
 marchenkova@crys.ras.ru

⁵ Ivanovo State University of Chemistry and Technology
 Sheremetevsky Pr. 7, Ivanovo, 153000, Russia
 kholodkov@isuct.ru

Abstract: Experimental results on the structure and physicochemical properties of thin-film photoconducting elements based on mesogenic mix-substituted phthalocyanine derivatives are presented. The features of supramolecular organization of the phthalocyanine derivatives in floating layers and thin films are established. The spectral properties are determined and the volt-lux sensitivity curves for both individual compounds and their systems with fullerene C₆₀ are obtained.

Keywords: Nanomaterials, photovoltaics, phthalocyanine, liquid crystals, discotics, Langmuir methods, thin films, structure, physicochemical properties.

Надмолекулярная организация и физико-химические свойства тонкопленочных фотополупроводниковых элементов на основе производных фталоцианина

^{1,2,3}Казак А.В., ¹Усольцева Н.В., ¹Смирнова А.И., ^{2,4}Марченкова М.А., ²Боднарчук В.В., ²Яблонский С.В., ⁵Холодков И.В.

¹ НИИ Наноматериалов, Ивановский государственный университет
ул. Ермака, 39, Иваново, 153025, Россия
alexkazak86@gmail.com

² ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
Ленинский пр., 59, Москва, 119333, Россия
alexkazak86@gmail.com

³ Московский государственный областной университет
ул. Веры Волошиной, 24, Мытищи, 141014, Россия
alexkazak86@gmail.com

⁴ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия
marchenkova@crys.ras.ru

⁵ Ивановский государственный химико-технологический университет
Шереметевский пр., 7, Иваново, 153000, Россия
kholodkov@isuct.ru

Аннотация: Представлены результаты экспериментального определения структуры и физико-химических свойств тонкопленочных фотополупроводниковых элементов на основе мезогенных смешанно-замещенных производных фталоцианина. Установлены особенности надмолекулярной организации исследованных производных фталоцианина в плавающих слоях и тонких пленках. Определены спектральные свойства и получены кривые вольт-люксовой чувствительности как для индивидуальных соединений, так и для их систем с фуллереном C₆₀.

Ключевые слова: наноматериалы, фотовольтаика, фталоцианин, жидкие кристаллы, дискотики, ленгмюровские методы, тонкие пленки, структура, физико-химические свойства.

1. Введение

В последние годы жидкие кристаллы и тонкие пленки макрогетероциклических соединений, полученные различными методами (вакуумным напылением, Ленгмюровскими методами и др.) представляют огромный интерес для науки и промышленности. Они широко применяются как перспективные элементы органической наноэлектроники, OLED, сенсоров и фотовольтаики [1-3]. В настоящее время необходимость перехода от дорогих и сложных в производстве кремниевых элементов наноэлектроники к более дешевым и технологичным органическим материалам становится особенно актуальной. Одними из перспективных органических материалов являются соединения, содержащие электронодонорные и электроно-

акцепторные функциональные группы (push-pull типа) на базе органических красителей [4-10]. Использование таких соединений можно достичь высокой степени эффективности преобразования света. Хотя эффективность органических солнечных элементов в настоящее время невысока (КПД лучших лабораторных образцов достигает 13%) [1] и пока еще значительно меньше, чем неорганических, дешевизна органических фотоэлементов делает их производство рентабельным даже при КПД 3% [11].

Таким образом, для создания новых эффективных тонкопленочных материалов на основе мезогенных смешанно-замещенных производных фталоцианина в данной работе определялась надмолекулярная организация получаемых пленок Ленгмюра-Шеффера и изучались их физико-химические свойства.

2. Объекты и методы исследований

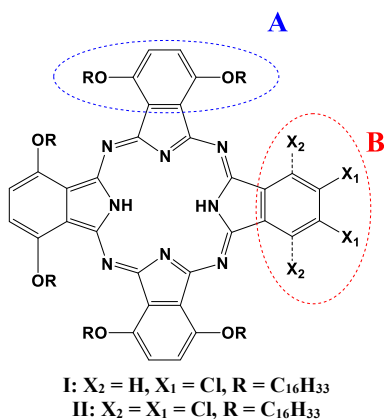


Рис. 1. Исследуемые производные фталоцианина.

Fig. 1. The investigated phthalocyanine derivatives

Объектами исследования явились мезогенные смешанно-замещенные фталоцианины типа A_3B (рис. 1). Пленки получали методами Ленгмюра-Шеффера. Ленгмюровские слои формировали из растворов соединений I и II ($C = 0,014$ мас. %) в хлороформе, где C – массовая доля растворенного вещества. Скорость сжатия слоя составляла 6–55 $\text{см}^2/\text{мин}$. Процесс формирования монослоя смешанно-замещенного производного фталоцианина на поверхности жидкости изучался *in situ* методом брюстеровской микроскопии. Исследования проводились на брюстеровском микроскопе BAM Optrel 3000 фирмы KSV Instruments, Финляндия. В качестве источника света в данной установке использовался HeNe лазер с длиной волны

излучения 633 нм и мощностью 10 мВт. Пленки Ленгмюра – Шеффера получали переносом слоев с поверхности воды на стеклянные подложки с ИТО-электродами при комнатной температуре (293–295 К) и поверхностном давлении $\pi = 0,6$ мН/м. Перенос слоев с поверхности воды осуществлялся методом Ленгмюра-Шеффера (горизонтальный лифт), $n = 1$ –50 слоев, где n – число переносов. Рельеф поверхности тонкопленочных образ-

цов был изучен с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver 47 Pro. Для изучения фототока органических структур использовались источники света на основе полупроводниковых светодиодов. Использовались Ga–Ag светодиоды с двумя фиксированными длинами волн, $\lambda_1 = 660$ нм и $\lambda_2 = 940$ нм. Пленочные образцы освещались прямоугольными импульсами света различной длительности. Фотоэлектрический сигнал регистрировали с помощью широкополосного запоминающего осциллографа. В эксперименте измерялся импульс тока через калиброванное сопротивление $R = 91$ к Ω , последовательно соединенное с фотоэлектрической ячейкой.

3. Результаты и их обсуждение

Для решения задачи получения эффективных тонкопленочных материалов для фотополупроводниковых элементов в процессе их изготовления мы исследовали структуру плавающих слоев и пленок Ленгмюра-Шеффера методами брестерской микроскопии и атомно-силовой микроскопии. У полученных фотополупроводниковых элементов были проанализированы электронные спектры поглощения. Максимум поглощения Q-полосы у соединения **I** находится при 649 нм, а у соединения **II**– при

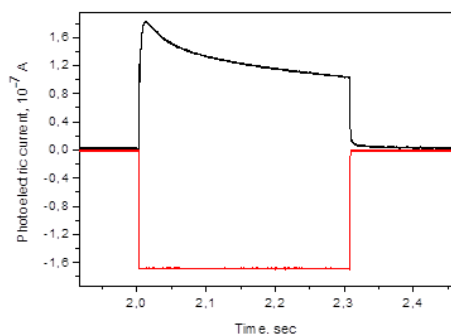


Рис. 2. Импульсы фотовольтаического тока в каскадной ячейке ИТО/II/I/C₆₀/Al при освещении прямоугольным импульсом света. Источник света на основе GaAs светодиода с длиной волны 660 нм.

Fig. 2. The pulses of the photovoltaic current in the cascade ИТО/II/I/C₆₀/Al cell under illumination by a rectangular light pulse. A light source based on a GaAs LED with a wavelength of 660 nm.

664 нм, т.е. наблюдается гипсохромный сдвиг по сравнению со спектрами растворов, наиболее выраженный у соединения **I**. Гетероструктурированный образец, содержащий соединения **I** и **II** сохранил расщепление Q-полосы, наблюдавшееся в растворе, но максимум также сдвинулся гипсохромно до 654 нм. Общее перекрытие видимой области спектра можно оценить как интервал между 600 и 720 нм. Таким образом, переход к конденсированному состоянию в пленке приводит к агрегационным процессам, отражающимся в гипсохромном сдвиге максимумов поглощения как индивидуальных компонент, так и гетероструктур на их основе. Да-

лее исследовались фотоэлектрические свойства гетерофазных систем соединений **I** и **II** с C_{60} , а также их каскадной структуры с C_{60} (рис. 2). Особенностью полученных фотодиодных структур является наличие достаточно интенсивного переходного тока, по сравнению с фотовольтаическим. Это может быть связано с разрядом и зарядом неглубоких ловушек на границе раздела фаз поликристаллический C_{60} -аморфный фталоцианин. Переходя к каскадной структуре на основе исследуемых соединений, мы смогли добиться существенного больших значений тока в фотовольтаическом режиме (рис. 2), по сравнению с ячейками представленными выше. Полученные значения уже сравнимы со значениями фотовольтаических токов в кремниевых образцах. Переходный ток также увеличился, что косвенно подтверждает наше предположение о природе переходного тока.

4. Заключение

Установлены особенности надмолекулярной организации смешанно-замещенных производных фталоцианина в плавающих слоях и пленках Ленгмюра-Шеффера. Определены условия формирования мономолекулярных слоев. Установлено, что переход к конденсированному состоянию в пленке приводит к агрегационным процессам, отражающимся в гипсохромном сдвиге максимумов поглощения, как индивидуальных компонент, так и гетероструктур на их основе. Исследованы фотополупроводниковые свойства тонкопленочных образцов на основе смешанно-замещенных производных фталоцианина совместно с фуллереном C_{60} , а также тройной системы (соединение **II** / соединение **I** / C_{60}). Особенностью полученных фотодиодных структур является наличие достаточно интенсивного переходного тока, по сравнению с фотовольтаическим.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа поддержана программой Минобрнауки РФ в рамках государственного задания Ивановскому государственному университету для выполнения научно-исследовательских работ, № 16.1037.2017/4.6 и частично выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-03-00883, 17-47-500757).

Список литературы

- [1] Mei J., Leung N.L.C., Kwok R.T.K., Lam J.W.Y., Tang B.Z. Aggregation-induced emission: together we shine, united we soar // *Chem. Rev.* 2015. V. 115. P. 11718-11940.
- [2] Chen Y., Wang Q., Chen J., Ma D., Yan D., Wang L. Organic semiconductor heterojunction as charge generation layer in tandem organic light-emitting diodes for high power efficiency // *Organic Electronics*. 2012. V. 13. No 7. P. 1121-1128.

- [3] Parkhomenko R., Sukhikh A., Klyamer D., Krasnov P., Gromilov S., Kadem B., Hassan A., Basova T. Thin films of unsubstituted and fluorinated palladium phthalocyanines: structure and sensor response toward ammonia and hydrogen // *J. Phys. Chem. C*. 2017. V. 121. No 2. P. 1200-1209.
- [4] Usol'tseva N.V., Smirnova A.I., Kazak A.V., Giricheva N.I., Galanin N.E., Shaposhnikov G.P., Bodnarchuk V.V., Yablonskii S.V. Mix-substituted phthalocyanine derivatives and their metal complexes as prospective nanostructured materials // *Opto-Electronics Review*. 2017. V. 25. No 2. P. 127-136.
- [5] Yum J.H., Jang S.R., Humphry-Baker R., Grätzel M., Cid J.J., Torres T., Nazeeruddin M.K. Effect of coadsorbent on the photovoltaic performance of zinc phthalocyanine-sensitized solar cells // *Langmuir*. 2008. V. 24. No 10. P. 5636-5640.
- [6] Kazak A.V., Usol'tseva N.V., Smirnova A.I., Dyakova Yu.A., Marchenkova M.A., Nabatov B.V., Tereschenko E.Yu., Kholodkov I.V. Optical properties and supramolecular organization of mix-substituted phthalocyanine holmium complex in Langmuir-Schaefer films // *Macroheterocycles*. 2015. V. 8. No 3. P. 284-289.
- [7] Усольцева Н.В., Смирнова А.И., Казак А.В., Ковалева М.И., Галанин Н.Е., Шапошников Г.П., Боднарчук В.В., Яблонский С.В. Оптические, мезоморфные и фотоэлектрические свойства лигандов и металлокомплексов смешанно-замещенных фталоцианинов типа АзВ // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2015. Т. 15. № 4. С. 56-71.
- [8] Pellegrino G., Alberti A., Condorelli G.G., Giannazzo F., La Magna A., Paoletti A.M., Pennesi G., Rossi G., Zanotti G. Study of the anchoring process of tethered unsymmetrical Zn-phthalocyanines on TiO₂ nanostructured thin films // *J. Phys. Chem. C*. 2013. V. 117. No 21. P. 11176-11185.
- [9] Галанин Н.Е., Шапошников Г.П., Смирнова А.И., Казак А.В., Усольцева Н.В. Синтез, спектральные и мезоморфные свойства смешанно-замещенных фталоцианинов на основе 3,6-диоктилосифталонитрила и 4,5-дихлорфтalonитрила, а также их комплексов с гольмием // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2014. Т. 14. № 4. С. 74-84.
- [10] Usol'tseva N.V., Kazak A.V., Luk'yanov I.Yu., Sotsky V.V., Smirnova A.I., Yudin S.G., Shaposhnikov G.P., Galanin N.E. Influence of molecular structure peculiarities of phthalocyanine derivatives on their supramolecular organization and properties in the bulk and thin films // *Phase Transitions: A Multinational Journal*. 2014. V. 87. No 8. P. 801-813.
- [11] Парашук Д.Ю., Кокорин А.И. Современные фотоэлектрические и фотохимические методы преобразования солнечной энергии. *Рос.хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*. 2008. Т. LII. № 6. С. 107-117.

References

- [1] Mei J., Leung N.L.C., Kwok R.T.K., Lam J.W.Y., Tang B.Z. Aggregation-induced emission: together we shine, united we soar. *Chem. Rev.*, 2015, vol. 115, pp. 11718 - 11940.
- [2] Chen Y., Wang Q., Chen J., Ma D., Yan D., Wang L. Organic semiconductor heterojunction as charge generation layer in tandem organic light-emitting diodes for high power efficiency. *Organic Electronics*, 2012, vol. 13, no. 7, pp. 1121 - 1128.
- [3] Parkhomenko R., Sukhikh A., Klyamer D., Krasnov P., Gromilov S., Kadem B., Hassan A., Basova T. Thin films of unsubstituted and fluorinated palladium phthalocyanines: struc-

ture and sensor response toward ammonia and hydrogen. *J. Phys. Chem. C*, 2017, vol. 121, no. 2, pp. 1200 - 1209.

[4] Usol'tseva N.V., Smirnova A.I., Kazak A.V., Giricheva N.I., Galanin N.E., Shaposhnikov G.P., Bodnarchuk V.V., Yablonskii S.V. Mix-substituted phthalocyanine derivatives and their metal complexes as prospective nanostructured materials. *Opto-Electronics Review*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 127 - 136.

[5] Yum J.H., Jang S.R., Humphry-Baker R., Grätzel M., Cid J.J., Torres T., Nazeeruddin M.K. Effect of coadsorbent on the photovoltaic performance of zinc phthalocyanine-sensitized solar cells. *Langmuir*, 2008, vol. 24, no. 10, pp. 5636 - 5640.

[6] Kazak A.V., Usol'tseva N.V., Smirnova A.I., Dyakova Yu.A., Marchenkova M.A., Nabatov B.V., Tereschenko E.Yu., Kholodkov I.V. Optical properties and supramolecular organization of mix-substituted phthalocyanine holmium complex in Langmuir-Schaefer films. *Macrocyclics*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 284 - 289.

[7] Usol'tseva N.V., Smirnova A.I., Kazak A.V., Kovaleva M.I., Galanin N.E., Shaposhnikov G.P., Bodnarchuk V.V., Yablonskii S.V. Optical, mesomorphic and photoelectric properties of the mix-substituted phthalocyanine ligands and their metal complexes of the A₃B type. *Liquid crystals and their application*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 56 - 71. (In Russian).

[8] Pellegrino G., Alberti A., Condorelli G.G., Giannazzo F., La Magna A., Paoletti A.M., Pennesi G., Rossi G., Zanotti G. Study of the anchoring process of tethered unsymmetrical Zn-phthalocyanines on TiO₂ nanostructured thin films. *J. Phys. Chem. C*, 2013, vol. 117, no. 21, pp. 11176 - 11185.

[9] Galanin N.E., Shaposhnikov G.P., Smirnova A.I., Kazak A.V., Usol'tseva N.V. Synthesis, spectral and mesomorphic properties of mix-substituted phthalocyanines based on 3,6-dioctyloxyphthalonitrile and 4,5-dichlorophthalonitrile, and their holmium complexes. *Liquid crystals and their application*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 74 - 84. (In Russian).

[10] Usol'tseva N.V., Kazak A.V., Luk'yanov I.Yu., Sotsky V.V., Smirnova A.I., Yudin S.G., Shaposhnikov G.P., Galanin N.E. Influence of molecular structure peculiarities of phthalocyanine derivatives on their supramolecular organization and properties in the bulk and thin films. *Phase Transitions: A Multinational Journal*, 2014, vol. 87, no. 8, pp. 801 - 813.

[11] Parashchuk D.Yu., Kokorin A.I. [Modern photovoltaic and photochemical methods of solar energy conversion]. *Ros. khim. zh. (Zh. Ros. khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva)*, 2008, vol. LII, no. 6, pp. 107 - 117. (In Russian).

Acknowledgements

The work was supported by the Program of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the state task for Ivanovo State University to carry out the research work (Grant No 16.1037.2017/4.6) and was partially supported by the RFBR (Grants No 16-03-00883, 17-47-500757)

Characteristics of surfaces of amorphous substrates and nanometer conductive films

¹Arsenichev S.P., ¹Glumova M.V., ¹Grigoriev E.V., ¹Zuev S.A., ¹Mazinov A.S.,

¹Orlenson V.B., ²Nalogin A.G., ¹Starostenko V.V., ¹Fitaev I.Sh.

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University

Simferopol, 295007, Russian Federation

sazuev@yandex.ru

²JSC "RPC "Istok" named after Shokin"

Fryazino, 141190, Russian Federation

Abstract: In this paper the studies of the surface relief of substrates and of thin metallization films deposited on them with a thickness of 1 ... 10 nm were made. It is shown that the surfaces of the substrates and nanometer films on them are spatially inhomogeneous in all dimensions and, as a result, we can say that for nanometer conductive films the concept of thickness is conditional. When EMF is applied to nanometer films, the processes of energy conversion into thermal energy are highly nonlinear. The presented research results are the starting points for constructing a model for the interaction of EMF with metal-dielectric structures (MDS).

Keywords: nanometer films, metal-dielectric structure, concept of thickness.

Характеристики поверхностей аморфных подложек и нанометровых проводящих пленок

¹Арсеничев С.П., ¹Глумова М.В., ¹Григорьев Е.В., ¹Зуев С.А.,

¹Мазинов А.С., ¹Орленсон В.Б., ²Налогин А.Г., ¹Старостенко В.В.,

¹Фитаев И.Ш.

¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»

г. Симферополь, 295007, Российская Федерация

sazuev@yandex.ru

²JSC "RPC "Istok" named after Shokin"

Fryazino, 141190, Russian Federation

Аннотация: В работе проведены исследования рельефа поверхности подложек и нанесенных на них тонких пленок металлизации с толщиной 1...10 нм. Показано, что поверхности подложек и нанометровых пленок на них пространственно неоднородны по всем измерениям и, как результат, можно говорить, что для нанометровых проводящих пленок понятие толщины условное. При воздействии

Copyright © 2018 for this paper by its authors. Copying permitted for private and academic purposes.

Proceedings of the 28th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2018) Sevastopol, Russian Federation, September 9—15, 2018

ЭМП на нанометровые пленки процессы преобразования энергии в тепловую энергию сугубо нелинейные. Приведенные результаты исследований являются исходными для построения модели взаимодействия ЭМП с металлодиэлектрическими структурами (МДС).

Ключевые слова: нанометровые пленки, металлодиэлектрическая структура, понятие толщины.

1. Введение

Свойств тонких проводящих пленок находятся в неразрывной связи со свойствами и характеристиками подложек, на которые они наносятся. Свойства подложек, рельеф их поверхности определяют свойства металлодиэлектрических структур (МДС), особенно в МДС с нанометровыми проводящими пленками. Для МДС с пленками толщиной порядка 1...10 нм можно условно говорить о толщинах пленок. При подобных толщинах в оптике и плазмоне вводят понятие «распределение наночастиц» на подложке.

Используемые в настоящее время подходы к описанию преобразования энергии электромагнитных полей (ЭМП) в тепловую энергию нанометровых пленок являются интегральными, т.е. в них не содержится физика преобразования энергий [1-6]. Мало того, исходными выражениями для характеристического сопротивления проводящей пленки являются выражения для скин-эффекта, доля которого в преобразовании энергий не более 5% при толщинах пленок порядка 10 нм и частоте ЭМП в 3 ГГц (удельная проводимость материала пленки

$10^6 \dots 10^7$ См/м). Аналогично можно ввести понятие эквивалентного сопротивления: из экспериментальных исследований оптических коэффициентов волноводными методами и баланса мощностей можно определить $R_{\text{ПОГЛ}}/R_{\text{ПАД}}$ для данной структуры найти ток, решая дифракционную задачу, и определить $R_{\text{ЭКВ}}$ через $P_{\text{ПОГЛ}} = I^2 R_{\text{ЭКВ}}$. При таком подходе опять-таки не фигурирует физика преобразования энергий в нанометровых проводящих пленках.

Исследования влияния материала, поверхности подложки и распределения наночастиц на поверхности подложки направлены на выяснение механизма и физики преобразования энергии ЭМП в тепловую энергию, что является важной и актуальной задачей, которой посвящена данная работа.

2. Исследования поверхностей аморфных подложек и проводящих пленок

При экспериментальных исследованиях оптических коэффициентов МДС с нанометровыми проводящими пленками волноводными методами использовались подложки из аморфных диэлектриков – боросиликатное стекло, ситалл, лавсановые, фторопластовые и полиэтиленовые пленки. В 10-сантиметровом диапазоне (P2-56) размеры широких граней подложек были 18×18 мм или 15×15 мм, что для волноводных измерений удовлетворяет условию корректности волноводных измерений $S_B \gg S_{\text{МДС}}$, где S_B – площадь поперечного сечения волновода, $S_{\text{МДС}}$ – площадь металлизации [7]. В других частотных диапазонах (P2-61 и P2-66) выполнялось масштабное соответствие $S_B / S_{\text{МДС}}$. В качестве проводящего материала использовались медь, алюминий, нихром и титан, напыление производилось магнетронным или ионным методом.

Основные свойства нанометровых пленок по отношению к воздействию ЭМП: а) практически отсутствует отражение у МДС с пленками толщиной в $2 \dots 10$ нм; б) значительное поглощение мощности ЭМП при толщинах пленок в $2 \dots 10$ нм (пространственный резонанс [1-10], поглощение может достигать 50% мощности падающей волны [2-5]; в) пространственный резонанс практически не зависит от частоты в диапазоне частот $2 \dots 25,5$ ГГц.

Приведенные в работах соотношения для поглощения в тонких проводящих пленках получены в предположении, что пленка пространственно однородна, т.е. имеет одинаковую толщину по всей структуре. На рис.1 и 2 приведены снимки поверхностей подложек из боросиликатного стекла, ситалла и профилограммы участков их поверхностей.

Аналогичные снимки получают и для подложек из полимерных материалов, характерной особенностью рельефа таких подложек являются достаточно глубокие борозды, которые получаются при формировании соответствующих пленок, что не сказывается на поглощении ЭМП такими пленками при толщине металлизации в $2 \dots 10$ нм.

Перед напылением металлизации пленки подвергались плазменной шлифовке, убирались выступы высотой более 10 нм. Снимки, приведенные на рис.1, 2 получены с помощью измерительной установки СЗМ (сканирующий зондовый микроскоп) NTEGRA с оптической головкой.

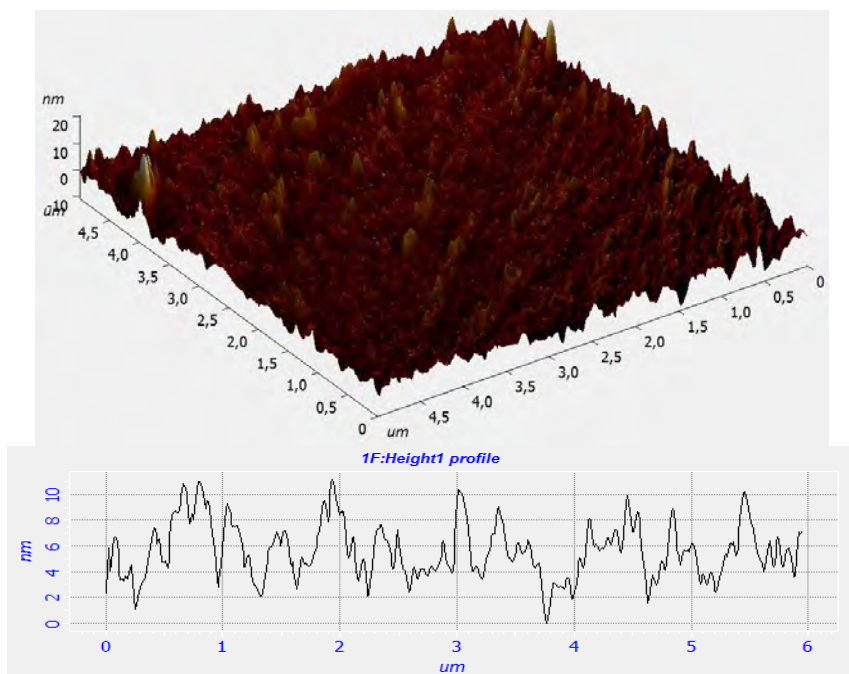


Рис. 1. Трехмерный фрагмент рельефа поверхности подложки из боросиликатного стекла и профилограмма участка структуры

Fig. 1. Three-dimensional fragment of the topography of the surface of a borosilicate glass substrate and a profilogram of a section of the structure

Исследования МДС были проведены с использованием полуконтактного зондового метода атомно-силовой микроскопии, который основан на различных типах взаимодействия зонда с исследуемой поверхностью [9] и позволяет получить данные для построения профилограмм, а также обеспечивает построение трехмерных моделей рельефа поверхностей. Измерительная установка имеет разрешающую способность по оси z (по толщине) не превышающую значения $0,8 \text{ нм}$.

На рис.3 и 4 приведены снимки поверхностей МДС с пленками из алюминия толщиной в 5 и 50 нм . Как следует из рис.1-4, можно употреблять понятие толщины пленки при $d < 10 \text{ нм}$ достаточно условно. Обычно при таких толщинах пленок это соответствует времени напыления. В целом необходимо употреблять термин «распределение наночастиц». С учетом рельефа подложки и распределения наночастиц получается естественная метаструктура.

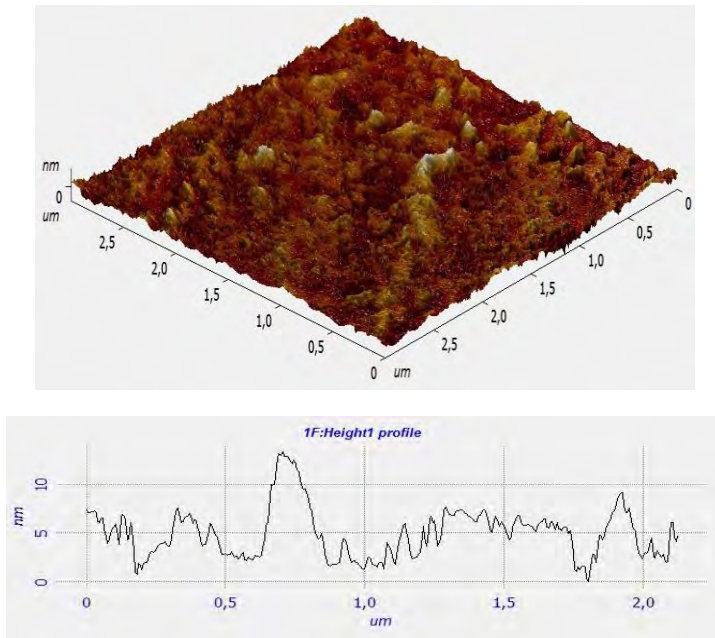


Рис. 2. Трехмерный фрагмент рельефа поверхности подложки из ситалла и профилограмма участка структуры

Fig. 2. Three-dimensional fragment of the relief of the surface of the substrate from the sitall and the profilogram of the section of the structure

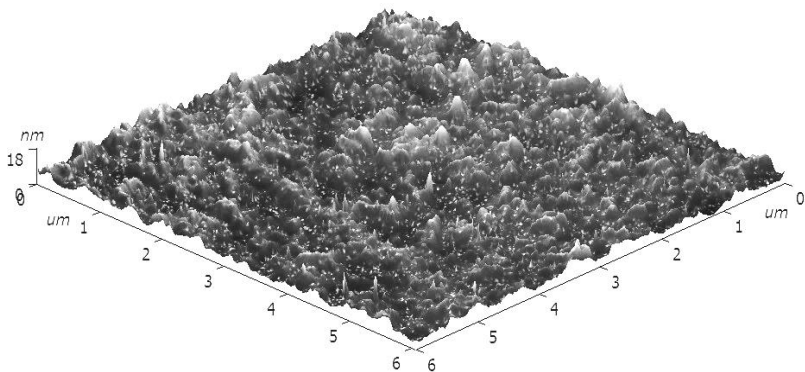


Рис. 3. Структура поверхности пленки из алюминия ($S = 6 \times 6$ мкм, $d = 5$ нм)

Fig. 3. The surface structure of the aluminum film ($S = 6 \times 6 \mu\text{m}$, $d = 5 \text{ nm}$)

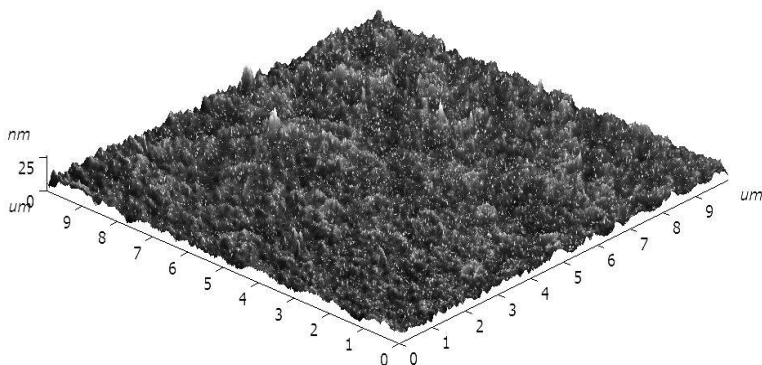


Рис. 4. Структура поверхности пленки из алюминия ($S = 10 \times 10$ мкм, $d = 50$ нм)

Fig. 4. The surface structure of the aluminum film ($S = 10 \times 10$ μm , $d = 50$ nm)

На наш взгляд физика процессов преобразования заключается в воздействии ЭМП на диполи наночастиц и диполи диэлектрика и воздействия электрического поля диполя наночастицы в ближней зоне на диполи диэлектрика.

3. Заключение

В работе приводятся результаты исследований рельефа поверхности и металлизации на подложке при использовании сканирующего зондового микроскопа NTEGRA с оптической головкой. Поверхности подложек и нанометровых пленок на них пространственно неоднородны по всем измерениям. Показано, что для нанометровых проводящих пленок понятие толщины условное. При воздействии ЭМП на нанометровые пленки процессы преобразования энергии в тепловую энергию сугубо нелинейные. Приведенные результаты исследований являются исходными для построения модели взаимодействия ЭМП с МДС и для возможных практических применений.

Источники финансирования

Доклад подготовлен в рамках работ, выполняемых по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Тема: «Исследования поглощающих и отражающих свойств слоистых структур, содержащих полимерные, проводящие, резистивные, диэлектрические, ферромагнитные пленки, с целью создания

неотражающих покрытий в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн» (Соглашение № 14.578.21.0267).

Список литературы

- [1] Bosman H., Lau Y., Gilgenbach R. Microwave absorption on a thin film // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. No. 9. P/ 1353-1355/
- [2] G. Nimtz, U. Panten. Broad band electromagnetic wave absorbers designed with nano-metal films // *Ann. Phys.* 2010. No. 1–2. P. 53–59.
- [3] F. Ding, Y. Cui, X. Ge, Y. Jin, S. He Ultra-broadband microwave metamaterial absorber // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 100. No. 10. P. 103504–103506.
- [4] Z. Chen, C. Xu, C. Ma, W. Ren, H.M. Cheng Lightweight and flexible grapheme foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding // *Adv. Mater.* 2013. P. 1296–1300.
- [5] Вдовин В.А. Нанометровые металлические пленки в датчиках мощных СВЧ импульсов // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 2009 г. С. 832 – 835.
- [6] С.А. Майер Плазмоника, теория и применения. Москва - Ижевск, 2011. 296 с.
- [7] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. Москва: Высшая школа, 1970. 440 с.

References

- [1] Bosman H., Lau Y., Gilgenbach R. Microwave absorption on a thin film // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. No. 9. P. 1353-1355.
- [2] G. Nimtz, U. Panten. Broad band electromagnetic wave absorbers designed with nano-metal films // *Ann. Phys.* 2010. No. 1–2. P. 53–59.
- [3] F. Ding, Y. Cui, X. Ge, Y. Jin, S. He Ultra-broadband microwave metamaterial absorber // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 100. No. 10. P. 103504–103506.
- [4] Z. Chen, C. Xu, C. Ma, W. Ren, H.M. Cheng Lightweight and flexible grapheme foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding // *Adv. Mater.* 2013. P. 1296–1300.
- [5] Vdovin V.A. [Nanometer metal films in sensors of high-power microwave pulse]. *III Vserossiiskaya konferenciya "Radiolokaciya i radiosvyaz"*. Moskva, 2009, pp. 832-835. (In Russian).
- [6] Maier S.A. *Plasmonics. Fundamentals and Applications*. Moskva-Igevsk, 2011. 296 p. (In Russian).
- [7] Lebedev I.V. *Microwave engineering*. V.1. M.: Vishaya shkola, 1970. 440 p. (In Russian).

Acknowledgements

The paper was prepared within the framework of the work carried out under the Federal Special-Purpose Program "Research and Development in Priority Areas for the Development of the Russian Science and Technology Complex for 2014-2020". Theme: "Investigations of the absorbing and reflecting properties of layered structures containing polymeric, conductive, resistive, dielectric, ferromagnetic films, in order to create non-reflective coatings in centimeter and millimeter wavelength ranges" (Agreement No. 14.578.21.0267).

Technology of formation of InSb nanowires in porous matrices of anodic aluminum oxide

¹Bozhev I.V., ²Gorokh G.G., ²Lozovenko A.A., ¹Napolskii K.S.,
³Obukhov I.A., ²Poznyak A.A., ^{1,3}Smirnova E.A.

¹Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov,
 Moscow, 119991, Russian Federation
 el_smirnova@systemres.ru

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
 220013, Republic of Belarus

³Research & Development Organization "Sinergetika",
 Moscow, 115419, Russian Federation

Abstract: Several methods for the formation of matrices of indium antimonide nanowires in the pores of anodic aluminum oxide on a gold substrate are presented. Advantages and disadvantages of applying contact groups for creating devices using collective effects in matrices are described.

Keywords: indium antimonide, nanowire, gold substrate, contacts, matrix, deposition technology.

Технология формирования нанопроводов анти- мониды индия в пористых матрицах анодного оксида алюминия

¹Божьев И.В., ²Горох Г.Г., ²Лозовенко А.А.,
¹Напольский К.С., ³Обухов И.А.,
²Позняк А.А., ^{1,3}Смирнова Е.А.

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация
 el_smirnova@systemres.ru

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
 ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь,
 gorokh@bsuir.by

³НПО «Синергетика», Москва, 115419, Российская Федерация
 i_obukhov@nposinergy.ru

Аннотация: Представлены несколько способов формирования матриц нанопроводов из антимоны индия в порах анодного оксида алюминия на золотой под-

ложке. Описаны преимущества и недостатки нанесения контактных групп для создания устройств, использующих коллективные эффекты в матрицах.

Ключевые слова: антимонид индия, нанопровод, золотая подложка, контакты матрицы, технология осаждения.

1. Введение

Уникальные свойства антимонида индия (*InSb*) делают этот материал одним из целевых для электроники сверхвысоких частот, ориентированной на низкое энергопотребление [1,2]. Благодаря малой эффективной массе электронов проводимости, при комнатной температуре на электрические характеристики структур из *InSb* с размерами 60 нм и меньше существенно влияет размерное квантование [1,3].

Современные технологии позволяют формировать в регулярных порах матриц анодного оксида алюминия (AOA) нанопровода из *InSb* с диаметром от 30 нм [4,5,6,7,8]. Таким образом, имеется возможность использовать на практике размерное квантование энергии электронов в этих объектах.

Указанными свойствами можно воспользоваться для создания функциональных электронных устройств на основе нанопроводов из антимонида индия, таких как активные элементы генераторов терагерцового излучения, фоточувствительные приборы, локальные системы охлаждения, антенные решетки терагерцового диапазона частот.

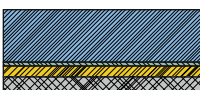
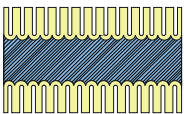
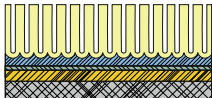
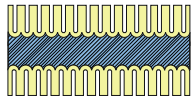
2. Технология формирования матриц

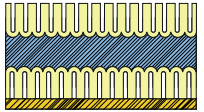
За рубежом активно исследуются методы создания планарных монокристаллических нанопроводов антимонида индия [7,9-12]. Их формируют на подложках объемного *InSb* или кремния при помощи селективной планарной эпитаксии, используя VLS (vapor-liquid-solid) механизм роста между «зародышами» из золота и других материалов. При этом электронная подвижность не всегда оказывается достаточно высокой, что обусловлено влиянием подложки на перенос заряда в нанопроводе.

Нанопровода из *InSb* в матрицах AOA могут быть сформированы на различных подложках стеклянных, диэлектрических или полупроводниковых, а также на свободных мембранах и подложках из пористого оксида алюминия [4,5,6,7,8]. Диаметры пор в матрицах AOA и толщина самого оксида задаются заранее, исходя из технических требований к создаваемому устройству.

Методика приготовления матриц АОА, предназначенных для формирования в них нанопроводов, размер пор, а также технология синтеза проводящих каналов нанопроводов и материал контактов определяют свойства и характеристики матричных структур. Важную роль в функционировании приборов на основе матриц нанопроводов играют переходы между контактными областями и проводящим каналом. Использование золотых контактов даёт надежду на получение плотностей тока близких к значениям $10^4 - 10^5$ А/см², которые были рассчитаны в работе [1]. В таблице 1 схематично показаны последовательности технологических процессов формирования нанопроводов *InSb* в порах тонких матриц АОА с золотым подслоем на кремниевых подложках и в нанопористых подложках из АОА.

Табл. 1. Технология формирования матриц
Table 1. Technology of matrix formation

Иллюстрация	Описание этапа	Иллюстрация	Описание этапа
	Подготовка КДБ подложки: обработка плавиковой кислотой, радиочастотная чистка в плазме аргона		Подготовка алюминиевой фольги h=100мкм, термориختовка, очистка от жиров и загрязнений, электрохимическая полировка
	Магнетронное напыление пленки Ti – 5 нм, Au – 50 нм, Al – 1 мкм		1 стадия анодирования создание «жертвенного» слоя АОА 0,3М растворе щавелевой кислоты, E _a = 40 В. На глубину 5 мкм
	Анодирование алюминия в 0,3М растворе щавелевой кислоты, температура электролита 6-8°C, с перемешиванием. E _a = 40 В. Диаметр пор 30 нм, t = 33 мин		Селективное химическое растворение АОА в растворе H ₃ PO ₄ +CrO ₂ +H ₂ O, T = 60°C, t = 15 мин
	Расширение пор в 2М растворе H ₂ SO ₄ до 33% пористости T = 50°C, t = 9,5 мин Диаметр пор – 40 нм, толщина стенки – 25 нм		2 стадия анодирования, E _a = 40 В на глубину 30 мкм. Создание упорядоченной структуры АОА

	Электрохимическое осаждение InSb, ГСР $j = 22 \text{ мА/см}^2$, $t = 90$ сек		Магнетронное напыление пленки Au – 200 нм
	Отжиг при температуре 400 °С		Селективное химическое растворение верхнего слоя АОА в растворе $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{CrO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $T = 60^\circ\text{C}$, $t = 25-30$ мин Удаление барьерного слоя и окислов Al в растворе KOH, $t = 10-20$ сек
Итог: матрица нанопроводов InSb длиной 30 мкм, диаметром 40 нм в порах АОА на кремниевой подложке с подслоем золота			Травление слоя алюминия в селективном травителе ($\text{HCl} + \text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$) комнатная температура, методом окунаения в СТ 10-15 сек -> дистилл. вода 10 сек
			Локальное химическое растворение барьерного оксидного слоя в 5% растворе H_3PO_4 $T = 50^\circ\text{C}$, $t = 15$ мин. Расширение пор в 2М H_2SO_4 до 20% пористости $T = 50^\circ\text{C}$, $t = 9,5$ мин Диаметр пор – 40 нм, толщина стенки – 25 нм, высота оксида 1 мкм
			Электрохимическое осаждение InSb, ГСР $j = 19 \text{ мА/см}^2$, $t = 42$ мин 30 сек
		Итог: матрица нанопроводов InSb длиной 30 мкм, диаметром 40 нм в порах АОА на золотой пленке	

3. Практические результаты

Было изготовлено двадцать образцов для осаждения антимонида индия в поры матрицы на кремниевой подложке. Во время анодирования пленки алюминия необходимо было решить вопрос неравномерного прохождения заряда по всей площади. Для минимизации этого эффекта нижняя часть, обеспечивающая присоединение к аноду полностью покрывалась серебряной пастой. В результате протравленная до подслоя золота

площадь увеличилась (Рис. 1а). После осаждения в поры антимонида индия были сделаны снимки образцов в электронном микроскопе. Как видно на Рис. 1b, барьерный слой протравлен полностью, обеспечивая контакт проводов к золоту, тем не менее осаждение происходит неравномерно, наблюдаются лишь единичные провода. Для решения этой проблемы необходима доработка технологического процесса.

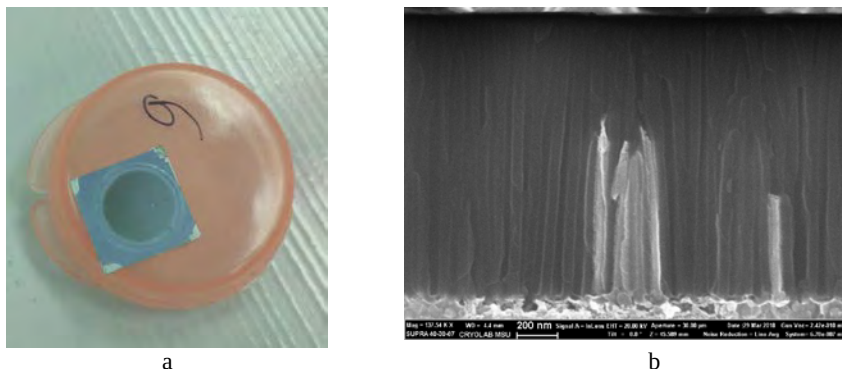


Рис. 1 Анодирование алюминия на кремниевой подложке (а), осажденные провода антимонида индия (b)

Fig. 1. Anodizing aluminum on a silicon substrate (a), precipitated wires of indium antimonide (b)

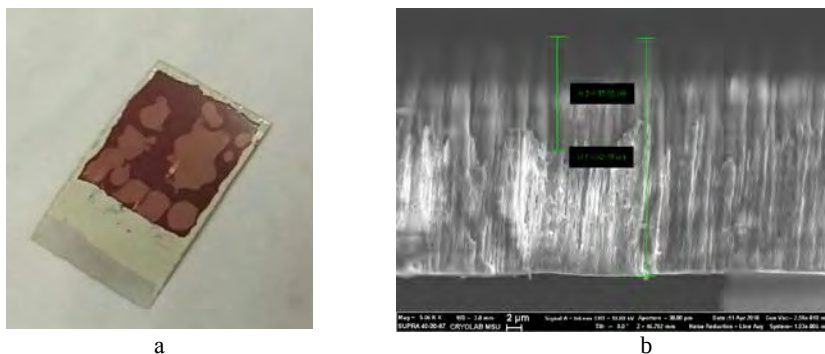


Рис. 2 Матрица AAO на золотой пленке (а), осажденные провода антимонида индия (b)

Fig. 2 Matrix AAO on a gold film (a), precipitated wires of indium antimonide (b)

При изготовлении образцов по второй технологии происходило отслаивание оксидной пленки от золота при удалении барьерного слоя (Рис. 2а) из-за активного газообразования на этом этапе. Для минимизации это-

го эффекта травление производилось последовательным кратковременным окусунанием в стакан с растворителем и дистиллированной водой. Осаждение в такие поры происходит более равномерно и полностью контролируется кинетикой процесса (Рис. 2b).

4. Заключение

Формирование матриц нанопроводов в темплейтах из АОА позволяет получать регулируемые диаметр и длину нанопроводов, что делает этот метод наиболее привлекательным.

Для получения хороших электрических характеристик нанопроводов необходимо использовать золотые контакты. Однако применение золотой пленки в качестве контактной области приводит к трудностям на всех этапах, начиная от подготовки поверхности, заканчивая осаждением. Решение этих проблем обеспечивается опытным путем, подбором режимов и реактивов при проведении большого количества экспериментов.

Имеющаяся в настоящее время технология позволяет получать единичные образцы приемлемого качества для проведения лабораторных экспериментов. Однако для создания промышленной технологии формирования матриц нанопроводов антимионид индия необходимо проделать еще большой объем работ по оптимизации технологических режимов.

Список литературы

- [1] Obukhov I.A. Some aspects of nanoelectronics development in Russia //WTEC Workshop Proceedings: Russian Research and Development Activities on Nanoparticles and Nanostructured Materials. S. Petersburg. 1997. P. 116-125.
- [2] Datta S. The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor // Sematech-2007. Oregon. USA. October 9th. 2007. <http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key%20Note%20Suman%20Datta.pdf>.
- [3] Obukhov I.A. Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices. LAMBERT Academic Publishing, 2014. 132 p.
- [4] Горох Г.Г. Высокоупорядоченные анодные оксидные пленки алюминия для формирования наноструктур // Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия. Сб. ст. – Петрозаводск: изд-во КГПУ, 2007. – С. 62-68.
- [5] Обухов И.А., Горох Г.Г. Электронные приборы на основе антимионид индия // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): материалы конф., в 2 т., Севастополь, 10-14 сент. 2012 г. / Вебер; редкол.: П.П. Ермолов [и др.]. - Севастополь, 2012. – Т.2. – С. 653-654.
- [6] Mozalev A. Direct observation of anodic film growth and dissolution on superimposed aluminum and nickel metallic layers / A. Mozalev, G. Gorokh, D. Solovei, A. Poznyak // Proceedings of the 13th European Microscopy Congress, (EMC 2004), Belgium, 22-24 Aug. 2004 / Gustaaf Van Tendeloo (Ed.) – Antwerp, 2004. – P. 533-534.

[7] Önder Gül1, David J. van Woerkom, Ilse van Weperen, Diana Car, Sébastien R Plissard, Erik P. A. M. Bakkers and Leo P. Kouwenhoven Towards high mobility InSb nanowire devices, *Nanotechnology*, 2015.- V. 26. - P. 215202-1 - 215202-7.

[8] Обухов И.А., Горох Г.Г., Лозовенко А.А., Смирнова Е.А. Матрицы нанопроводов из антимонида индия и их применения для генерации СВЧ излучения. *Наноиндустрия*, 2017. - № 7 (77). - С. 96 – 108.

[9] Zai-Xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang et al. Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors. *Nanoscale*, 2013.-V. 5 - P. 9671 –9676

[10] Yennai Wang, Junhong Chi, Karan Banerjee et al. Field effect transistor based on single crystalline InSb nanowire, *J. Mater. Chem.*, 2011. - V. 21. - P. 2459 - 2462

[11] Muhammad Shafa, Sadaf Akbar, Lei Gao et al. Indium Antimonide Nanowires: Synthesis and Properties, *Nanoscale Research Letters*, 2016. - 11:164. - P. 1-20

[12] Sasa Gazibegovic, Diana Car, Hao Zhang et al. Epitaxy of advanced nanowire quantum devices, *Nature*, 2017. - V. 548. - P. 434-447.

References

[1] Obukhov I.A. [Some aspects of nanoelectronics development in Russia]. *WTEC Workshop Proceedings: Russian Research and Development Activities on Nanoparticles and Nanostructured Materials*. 1997. pp. 116-125.

[2] Datta S. [The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor]. *Sematech-2007*. Oregon. USA. October 9th. 2007. <http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key%20Note%20Suman%20Datta.pdf>.

[3] Obukhov I.A. [Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices]. *LAMBERT Academic Publishing*, 2014. 132 p.

[4] Gorokh G.G. [Highly ordered anodic aluminum oxide films for forming a nanostructure tour]. *Nanostructured oxide films and coatings. Digest of articles*. 2007. – pp. 62-68. (In Russian)

[5] Obukhov I.A., Gorokh G.G. [Electronic devices based on indium antimonide] *Proceedings of 22 Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2012)*. — 2012. — T. 2. — pp. 653-654. (In Russian)

[6] Mozalev A. [Direct observation of anodic film growth and dissolution on superimposed aluminum and nickel metallic layers] *Proceedings of the 13th European Microscopy Congress, (EMC 2004), Belgium, 22-24 Aug. 2004 – Antwerp, 2004. – pp. 533-534.*

[7] Önder Gül1, David J. van Woerkom, Ilse van Weperen, Diana Car, Sébastien R Plissard, Erik P. A. M. Bakkers and Leo P. Kouwenhoven [Towards high mobility InSb nanowire devices], *Nanotechnology*, 2015.- V. 26. - pp. 215202-1 - 215202-7.

[8] Obukhov I.A., Gorokh G.G., Lozovenko A.A., Sмирнова Е.А. [Matrices of nanowires from indium antimonide and their applications for the generation of microwave radiation.] *Nanoindustry*, 2017. - № 7 (77). - pp. 96 – 108.

[9] Zai-Xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang et al. [Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors]. *Nanoscale*, 2013.-V. 5 - pp. 9671 –9676

[10] Yennai Wang, Junhong Chi, Karan Banerjee et al. [Field effect transistor based on single crystalline InSb nanowire], *J. Mater. Chem.*, 2011. - V. 21. - pp. 2459 - 2462

[11] Muhammad Shafa, Sadaf Akbar, Lei Gao et al. [Indium Antimonide Nanowires: Synthesis and Properties], *Nanoscale Research Letters*, 2016. - 11:164. - pp. 1-20

[12] Sasa Gazibegovic, Diana Car, Hao Zhang et al. [Epitaxy of advanced nanowire quantum devices], *Nature*, 2017. - V. 548. - P. 434-447.

Научно-технические основы применения наноструктурного материаловедения и наноэлектроники в системах микроэлектромеханических преобразователей энергии специального назначения

¹Гандилян С.В., ²Гандилян Д.В.,

¹Ереванский государственный университет
ул. Алек Манукян, 1, Ереван, 375025, Армения
angastroi@mail.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана
2-я Бауманская ул. д.5, стр. 1, 105005, Москва
david.gandilyan@mail.ru

Аннотация: Дан краткий обзор современного состояния совершенно нового направления электромеханической науки – микросистемной электромеханики. Предложен новый обобщенный подход к исследованию динамических и энергетических характеристик микроминиатюрных- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС), как базовых объектов исследования современной микросистемной электромеханики. Описаны основные технологические приемы конструирования функциональных элементов МЭМС и НЭМС нового вида – с бинарно-сопряженными подсистемами, охарактеризованы области их применения в традиционной и новой технике (в информационных и компьютерных технологиях, медицине, аэрокосмических и ракетноартиллерийских системах и т.д.).

Ключевые слова: микроминиатюрная электромеханика, наноэлектромеханика, МЭМС и НЭМС, бинарно-сопряженная электрофизика, самоорганизация, электробиология, магнитобиология.

1. Введение

В настоящее время наряду с микроэлектроникой, компьютерной техникой, телекоммуникацией и т.д. в области современной электромеханической науки наиболее ярко проявляется жизненная необходимость миниатюризации (и сверхминиатюризации) функциональных элементов электромеханических преобразователей энергии специального назначения и их систем. В современной научной литературе это направление развития электромеханики толкуется как «микросистемная электромеханика» – важнейшая отрасль современной микросистемной техники, базовыми объ-

ектами исследования которой являются системы микроминиатюрных- и наноэлектромеханических преобразователей (ЭМП) энергии (МЭМС и НЭМС) [1, 2].

По мнению специалистов, в последние годы прогресс в области развития теории и моделей микромира (и соответственно в микросистемной электромеханике) достигается в основном путем использования более мощных компьютерных программ и в гораздо меньшей мере из-за появления новых теоретических представлений и моделей [3-7].

Для дальнейшего развития микросистемной электромеханики (особенно в наноструктурном уровне), большой практический интерес имеет совершенствование методов теоретических построений и моделей, углубленного изучения электромагнитных и тепловых полей, уточнение численных методов исследования переходных электрофизических и электромеханических процессов в задачах автоматизированного проектирования МЭМС и НЭМС.

В данной работе предложен новый обобщенный подход к решению некоторых узловых вопросов физико-математического моделирования и расчета энергетических характеристик МЭМС и НЭМС, позволяющего учитывать большое число, определяющих их динамическое поведение, взаимосвязанных факторов.

При этом, исходя из базовых теоретических и технологических принципов современной микромеханики и микроэлектроники, первостепенным считается четкое физико-математическое толкование терминов МЭМС и НЭМС и их классификация по динамическим и функциональным характеристикам.

2. Объекты и методика их исследования

Объектами исследования являются:

1. МЭМС — как многоэлементные динамические системы нелинейно взаимодействующих бинарно-сопряженных (электро-индукционных и магнито-индукционных) микроминиатюрных электромеханических преобразователей энергии (ЭМП).

2. НЭМС — как многоэлементные динамические системы нелинейно взаимодействующих бинарно-сопряженных (электро-индукционных и магнито-индукционных) микроминиатюрных наноэлектромеханических преобразователей энергии.

В настоящей работе, исходя из вышеуказанной трактовки терминов МЭМС и НЭМС, их обобщенное электрофизическое моделирование осу-

ществляется на базе основных положений и принципов бинарно-сопряженной электрофизики [8-10].

При этом:

- анализ и синтез электротехнических систем с рабочим (динамическим) магнитным полем, в том числе и электро-индукционных ЭМП энергии, во всем диапазоне энергетического (и частотного) спектра осуществляется на базе обобщенного Лагранжо-Максвелловского пространства энергетического состояния и, следовательно, уравнений преобразования электромагнитного поля Фарадея-Максвелла;

- анализ и синтез электротехнических систем с рабочим (динамическим) электрическим полем, в том числе и магнито-индукционных ЭМП энергии во всем диапазоне энергетического (и частотного) спектра осуществляется на базе обобщенного бинарно-сопряженного пространства энергетического состояния и соответственной модификации системы уравнений Фарадея-Максвелла.

3. Вопросы обобщенного физико-математического моделирования МЭМС

При вышеуказанной трактовке термина МЭМС их обобщенное физико-математическое моделирование можно осуществлять на базе исследования динамических режимов и энергетических характеристик микроминиатюрных ЭМП исходя из интегрального принципа наименьшего Действия электродинамики и электромеханики [9, 11], который выражается в следующих бинарно-сопряженных эквивалентных формах:

- для электроиндукционных (индуктивных) микроминиатюрных ЭМП

$$E_B(t)dt = \sum_1^n d(\oint m_i \mathcal{V}_i dl_i + \iint d\Psi_i dq_i), \quad (1)$$

где n – число контуров тока, m_i – масса, $\mathcal{V}_i$ – скорость, q_i – электрический заряд, Ψ_i – магнитное потокоцепление, i -ого контура тока;

- для магнитно-индукционных (емкостных) микроминиатюрных ЭМП

$$E_B^*(t)dt = \sum_1^h d(\oint m_j^* \mathcal{V}_j^* dl_j + \iint dQ_j^* d\psi_j^*), \quad (2)$$

где h – число контуров напряжения, m_j^* – масса, v_j^* – скорость, Q_j^* – рабочее электрическое потокоцепление, ψ^* – магнитный поток индуцированный рабочим электрическим полем для j -ого контура напряжения.

В уравнениях (1) и (2) энергетические функции $E_B(t)$ и $E_B^*(t)$ характеризуют интенсивность взаимодействия ЭМП со внешней средой. В изолированных электромеханических телах $E_B = E_B^* = 0$.

Не нарушая общности, можно предположить, что рассматриваемая по определению 1 МЭМС, как сложная динамическая система, состоит из нелинейно взаимодействующих электро-индукционных (с числом M) и магнитно-индукционных (с числом N) микроминиатюрных ЭМП.

Следовательно, в рассматриваемом случае динамическое поведение МЭМС можно описывать на базе корректировки основных теоретических положений принципа *наименьшего действия* для диссипативных систем в некотором $\langle M+N \rangle$ -мерном пространстве аксиальных обобщенных векторов (механических и электрофизических признаков энергетического состояния микроминиатюрных ЭМП) – $(\alpha, \beta) = (x^o, P^o; q^o, \Psi^o; \psi^{*o}, Q^{*o})$ [9, 11], где приняты следующие обозначения:

α – субвектор обобщенных механических и электрофизических координат МЭМС:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= (x^o, q^o, \psi^{*o}); \\ x^o &= (x_L, x_c); \\ x_L &= (x_1, x_2, \dots, x_M); \\ x_c &= (x_1^*, x_2^* \dots, x_N^*); \\ q^o &= (q_1, q_2, \dots, q_M); \\ \psi^{*o} &= (\psi_1^*, \psi_2^* \dots \psi_N^*); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

β – субвектор обобщенных механических и электрофизических импульсов МЭМС:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= (P^o, \Psi^o, Q^{*o}); \\ P^o &= (P_L, P_c); \\ P_L &= (P_1, P_2, \dots, P_M); \\ P_c &= (P_1^*, P_2^* \dots, P_N^*); \\ \Psi^o &= (\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_M); \\ Q^{*o} &= (Q_1^* Q_2^* \dots Q_N^*). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

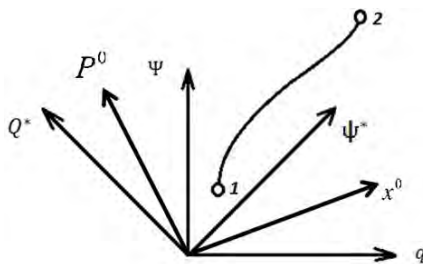


Рис. 1. Траектория динамического режима МЭМС в многомерном пространстве энергетического состояния.

Согласно обобщенной формулировке *принципа наименьшего действия* для диссипативных систем, моделирование динамических режимов МЭМС можно осуществить в обобщенном пространстве энергетического состояния. Многомерное пространство (α, β) характеризуется определенной функцией энергетического состояния – $\mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t)$ (функцией Лагранжа для данной МЭМС), при котором поведение системы между фиксированными положениями 1 (при $t = t_1$; $\alpha_1 = (x_1^0, q_1^0, \psi_1^{*0})$) и 2 (при $t = t_2$; $\alpha_2 = (x_2^0, q_2^0, \psi_2^{*0})$) (рис. 1) подчиняется *принципу экстремума полного действия*

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S} &= \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t) dt; \\ \alpha(t) &= \arg \min_{\alpha(t)} \mathcal{S}; \\ \delta \mathcal{S} &= 0, \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где действие – $\mathcal{S}$ определяется как определенный интеграл-функционал от энергетической функции Лагранжа – $\mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t)$ выражающего в форме разности между эффективной электрокинетической – $T(\dot{\alpha}(t))$ и эффективной электропотенциальной – $U(\alpha(t))$ энергией на *траектории* динамического режима МЭМС в многомерном пространстве (α, β) [12].

Необходимый Лагранжиан для обобщенной модели МЭМС может быть построен с помощью введения нового, в данном случае $(M \times N)$ -размерного тензора взаимодействия (взаимного влияния) между магнитными (электро-индукционными) и емкостными (магнитно-индукционными) функциональными элементами МЭМС:

$$\widehat{K}_N^M(q^0, \psi^{*0}) = \begin{bmatrix} K_M^N(q_1, \psi^{*1}) & \cdots & K_M^N(q_1, \psi^{*N}) \\ \vdots & & \vdots \\ K_M^N(q_M, \psi^{*1}) & \cdots & K_M^N(q_M, \psi^{*N}) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

При этом обобщенная Лагранжевая функция для МЭМС можно представлять в следующей форме:

$$\mathcal{L}_0 = \mathcal{L}_L + \mathcal{L}_C + \Delta\mathcal{L}_{LC}, \quad (7)$$

где $\Delta\mathcal{L}_{LC}$ – член Лагранжиана, учитывающий нелинейное электрофизическое взаимодействие между функциональными элементами системы электро-индукционного (индуктивного) и магнитно-индукционного (емкостного) действия.

При этом уравнения динамики МЭМС определяются в следующей векторно-матричной форме:

- уравнения электродинамики

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}\Psi^0 + \dot{q}^0 \widehat{R}_D + \psi^{*0} \frac{d\widehat{K}_N^M}{dt} \psi^{*0T} + \widehat{K}_N^M \frac{d^2\psi^{*0}}{dt^2} &= \psi_{CL}^{*0}; \\ \frac{dQ^{0*}}{dt} + \psi^{*0} \widehat{G}_D + \dot{q}^0 \frac{d\widehat{K}_N^M}{dt} \dot{q}^{0T} + \widehat{K}_N^M \frac{d^2q^0}{dt^2} &= \dot{q}_{LC}^0; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

- уравнения электромеханических сил, действующих на функциональные элементы МЭМС

$$F_{ЭМ}^0 = \frac{d}{dx^0} \left[(\dot{q}^0 \widehat{L}^0 \dot{q}^{0T}) + (\psi^{*0} \widehat{C}^0 \psi^{*0T}) + (\dot{q}^0 \widehat{K}_N^M \psi^{*0T}) \right], \quad (9)$$

где $\dot{q}_{LC}^0$ и ψ_{CL}^{*0} – субвекторы токов и напряжений между емкостными и индуктивными функциональными элементами МЭМС:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_{LC}^0 &= (\dot{q}_{LC/1}, \dot{q}_{LC/2}, \dots, \dot{q}_{LC/M}); \\ \psi_{CL}^{*0} &= (\psi_{CL/1}^*, \psi_{CL/2}^*, \dots, \psi_{CL/N}^*). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Системы уравнения (8) и (9) носят универсальный характер для МЭМС всевозможной конструкции и их совместное решение полностью определяет динамическое поведение обобщенной модели МЭМС в любых режимах.

Для исследования МЭМС конкретной конструкции необходимо в задачах автоматизированного проектирования в этих уравнениях учесть все конструкционные особенности их функциональных элементов.

4. Вопросы обобщенного физико-математического моделирования НЭМС

Физико-техническое обоснование применения основных принципов и положений бинарно-сопряженной электрофизики в задачах исследования динамических и энергетических характеристик нано ЭМП энергии и их систем осуществлено в работах [1, 2, 13], где рассматриваются следующие узловые вопросы:

- электрофизическое моделирование процессов энергопреобразования между функциональными ячейками нано ЭМП энергии;
- взаимодействие нано ЭМП энергии со внешней средой;
- рассмотрение нано ЭМП энергии в системе других наноструктур;
- как результат этих исследований комплексное физико-математическое и компьютерное моделирование НЭМС.

При этом для обобщенного физико-математического моделирования и автоматизированного проектирования нано ЭМП энергии необходимо исходные базовые уравнения электро-индукционной и магнитно-индукционной электромеханики (уравнения преобразования электромагнитного поля «LC» контура в подобластях индуктивности «L» и емкости «C» соответственно) корректировать основополагающими принципами квантовой электрофизики, учитывая следующие узловые факторы:

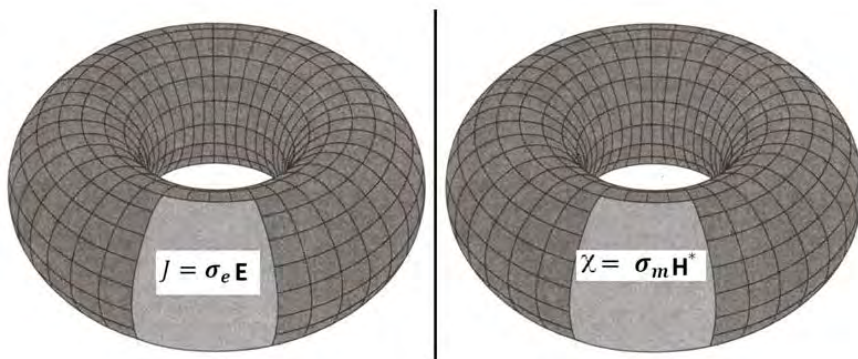


Рис. 2. Схема замкнутых электропроводящих – (а) и магнитнопроводящих – (б) нанотрубок.

1. Для электро-индукционных нано ЭМП элементарным функциональным элементом энергопреобразования (базовой ячейкой) является замкнутая сверх электропроводящая нанотрубка, энергетическое состояние которого в фазовом пространстве обобщенных сил Лагранжа-Максвелла – $(\Psi(t), q(t))$ представляется неподвижной точкой устойчивости.

2. Аналогично для магнитно-индукционных нано ЭМП элементарным функциональным элементом энергопреобразования (базовой ячейкой) является замкнутая сверхмагнитнопроводящая нанотрубка, энергетическое состояние которого в сопряженном фазовом пространстве – $(Q^*(t), \psi^*(t))$ представляется неподвижной точкой устойчивости (рис. 2) [14, 15].

Наглядной иллюстрацией сказанному дает биофизика на уровне природных наноактюаторов. Например, рассматривая положения, которые могут занимать молекулы белков и нуклеиновых кислот, мы сталкиваемся с аналогичными топологическими характеристиками структур живой природы. Для энергообмена молекулы со внешней средой необходимо разорвать химические связи данного участка полимерной цепи. Энергетические затраты такого процесса довольно значительны, поэтому при достаточно низкой температуре и слабых воздействиях внешних электромагнитных полей вероятность разрыва молекулы мала и оно может существовать в состоянии энергетического минимума практически долго [16].

Исходя из принципов бинарно-сопряженной электрофизики можно утверждать, что:

1. Процесс электромагнитного взаимодействия в наноструктурных ячейках электро-индукционных ЭМП энергии можно описать на основе уравнений преобразования электромагнитного поля Фарадея-Макавелла-Лоренца в форме:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \operatorname{rot}[\vec{B} * \vec{u}]; \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= j + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right); \\ m_{\text{э}} \frac{d\vec{v}_e}{dt} &= e_{\text{э}}(\vec{E} + [\vec{v}_e * \vec{B}]); \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0; \\ \vec{B} &= \operatorname{rot} \vec{A}; \operatorname{div} \vec{D} = \rho; \vec{v}_e \\ \vec{j} &= Ne\vec{v} \cong \rho \vec{v}; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $\vec{u}$ – скорость деформации электропроводящих нанотрубок, ρ и $\vec{j}$ – плотности заряда и тока, обусловленные наличием электронного «газа» проводимости, $m_{\text{э}}$ – эффективная масса, $e_{\text{э}}$ – эффективный заряд, $\vec{v}_e$ – скорость центра масс «индуктора» нано ЭМП энергии.

2. Процессы электромагнитного взаимодействия в наноструктурных ячейках магнитно-индукционных ЭМП энергии можно описать на основе бинарно-сопряженной модификации уравнений Фарадея-Макавелла-Лоренца, где представление о магнитных зарядах (монополи Драка) – удобная абстракция [9, 17]. Они представляются в форме:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}^* &= -\frac{\partial \vec{D}^*}{\partial t} - \operatorname{rot}[\vec{D}^* * \vec{u}^*]; \\ \operatorname{rot} \vec{E}^* &= \vec{x} + \frac{\partial \vec{B}^*}{\partial t}; \\ m_\varphi \frac{d\vec{v}_\varphi}{dt} &= \varphi(\vec{H}^* + [\vec{v}_\varphi * \vec{D}^*]); \\ \operatorname{div} \vec{D}^* &= 0; \vec{D}^* = \operatorname{rot} \vec{K}; \\ \operatorname{div} \vec{B}^* &= \rho_m; \\ \vec{x} &= M_N \varphi \vec{v}_\varphi \cong \rho_m \vec{v}_\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Совместное решение (5)-(12) полностью определяет динамическое электрофизическое поведение обобщенной модели НЭМС в любых режимах. Для наследования НЭМС конкретной конструкции необходимо в задачах автоматизированного проектирования учесть все конструкционные и топологические особенности их функциональных элементов.

5. Практические результаты

Предложенный новый подход в настоящей работе физико-математического моделирования, расчета оптимальных динамических и энергетических характеристик и автоматизированного проектирования МЭМС и НЭМС позволяет учитывать большое число взаимосвязанных факторов (конструкционных, технологических и т.д.) и параметров внешнего воздействия.

6. Заключение

Таким образом, в работе рассмотрены некоторые узловые вопросы электрофизического моделирования МЭМС и НЭМС. Предложен новый обобщенный подход исследования динамических и энергетических характеристик МЭМС и НЭМС как сложных динамических систем с бинарно-сопряженными подсистемами.

Получены системы уравнения, полностью определяющие динамическое и энергетическое поведение обобщенных моделей МЭМС и НЭМС в любых режимах.

На базе предложенных теоретических принципов и моделей рассматриваются возможности исследования электрофизических характеристик биологических наноструктур.

Выражение признательности

Авторы выражают признательность члену-корреспонденту НАН РА Г.С. Караяну (Ереванский государственный университет) за внимание к работе и ряд полезных советов.

Список литературы

- [1] Гандилян С.В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования микро- и нанoeлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) // Нано и микросистемная техника. 2015. Т. 181. № 8. С.13.
- [2] Караян Г.С., Гандилян С.В., Гандилян В.В. Нанотехнология в современной электромеханике // Электричество. 2013. №3. С. 2-9.
- [3] Нано и микросистемная техника: от исследований к разработкам / Под ред. П.П.Мальцева М.: Техносфера. 2005. 361 с.
- [4] Паун Г., Розенберг Г., Салома А. ДНК-компьютер. М.: Мир. 2004, 524 с.
- [5] Харрис П. Углеродные нанотрубки и их родственные структуры: Новые материалы XXI века. М.: Техносфера. 2003. 336 с.
- [6] Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплынго. М. Техносфера. 2005. 446 с.
- [7] Knobel R., Cleland A. New NEMS device // Nature. 2003. Vol. 424. P. 291-295.
- [8] Уайт Д.С., Вудсон Г.Х. Электромеханическое преобразование энергии. М.-Л.: Энергия. 1964. 528 с.
- [9] Стражев В.Н., Томилчик Л.М. Электродинамика с магнитным зарядом. Минск: Наука и техника. 1975. 420 с.
- [10] Иосифьян А.Г. Эволюция физических основ электротехники и электродинамики // Электричество 1987, №12; 1989, №9. С. 19-26.
- [11] Копылов И.П., Гандилян С.В. Гандилян В.В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии // Электротехника. 1998. №9. С. 25-40.
- [12] Копылов И.П. Математическое моделирование электромеханических преобразователей энергии. – М.: Высшая школа 2001. 389 с.
- [13] Караян Г.С., Гандилян С.В. Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. №6. С.370-380.
- [14] Воронов В.К., Подоплелов А.В., Сагдеев Р.З. Физические основы нанотехнологии.– М.: издательство URSS. 2010. 429 с.
- [15] Чечнин Н.Г. Магнитные наноструктуры и их применение.– М.: Изд-во Грант Виктория ТК. 2006. 166 с.
- [16] Ulrich A.S. Biophysical aspects of using liposomes as delivery vehicles. Bioscience Reports. Vol 22. №2. 2002. P. 328-334.
- [17] Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. М.: Мир. 1983. 302 с.

Тепловые и электрические характеристики плоских нагревателей из алюминия с нанопористым анодным оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити

¹Врублевский И.А., ¹Чернякова К.В., ¹Горбачев Д.В.,
²Муратова Е.Н., ²Мошников В.А.

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь
vrublevsky@bsuir.edu.by

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ
им. В.И. Ульянова (Ленина)
ул. проф. Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
SokolovaEkNik@yandex.ru

Аннотация: Представлены результаты исследований тепловых характеристик алюминиевых нагревателей со слоем анодного оксида алюминия. В конструкции нагревателя из алюминия углеродная электропроводящая нить на основе вискозной технической нити использовалась в качестве нагревательного элемента. Для герметизации конструкции нагревателя применяли силиконовый компаунд.

Ключевые слова: плоский нагреватель, алюминиевое основание, нанопористый анодный оксид алюминия, углеродная нить, силиконовый компаунд.

1. Введение

Большое разнообразие видов и форм плоских нагревателей позволяет применять их в различных технических устройствах связанных с использованием тепловых процессов. Так значительное число технологических процессов в промышленности для повышения их эффективности требуют нагрева различных поверхностей тел, газов или жидкостей с помощью электрических нагревателей. Электронная аппаратура, функционирующая в климатических условиях с низкими отрицательными температурами, для обеспечения бесперебойной работы нуждаются в принудительном подогреве. Не менее важную роль играют тепловые процессы в повседневной деятельности человека. Они позволяют создать комфортные условия для работы и отдыха, оказывая тем самым значительное влияние на производительность труда. Все эти примеры показывают, что нагревательные элементы играют важную роль в развитии технического прогресса и жизнедеятельности человека.

Среди плоских нагревателей наиболее эффективными являются металлические нагревательные элементы [1,2]. Основными задачами при разработке таких нагревателей является обеспечение надежной изоляции контура электрической цепи сопротивления, как от металлической основы, так и от окружающей среды.

В настоящей работе для повышения рабочей температуры до 200⁰С предложена конструкция алюминиевого плоского нагревателя с использованием силиконового компаунда в качестве герметизирующего полимера. Приведены результаты исследований тепловых характеристик таких нагревателей.

2. Экспериментальная часть

Плоский нагревательный элемент имел размеры 60х24 мм. Толщина основания из анодированного алюминия составляла 0,5 мм. На образцах анодированного алюминия слой пористого анодного оксида алюминия, сформированный методом анодирования алюминия, имел толщину 20 мкм. Такая толщина пористого анодного оксида алюминия обеспечивала необходимую изоляцию нагревательного элемента от металлического основания. В конструкции нагревателя из алюминия с нанопористым оксидом алюминия углеродная электропроводящая нить на основе вязкой технической нити использовалась в качестве нагревательного элемента. Для изготовления резистивных элементов использовали нить из углеродного волокна с размерами 80 мкм (толщина)*4 мм (ширина)*170 (длина). Концы нити из углеродного волокна металлизировались слоем меди (толщина 30 мкм, гальваническое осаждение) для последующей пайки в процессе сборки электрического нагревателя.

Фиксацию углеродной нити на поверхности анодного оксида алюминия и затем ее герметизацию осуществляли с помощью силиконового компаунда. Электрический нагреватель с нитью из углеродного волокна имел электрическое сопротивление 30 Ом и мощность 13,5 Вт (рабочее напряжение 20 В).

Измерение сопротивления диэлектрической изоляции проводилось с помощью мегаомметра Ф4101. Для получения термограмм поверхности нагревателя использовали тепловизионную камеру MobIR M4.

3. Практические результаты

Для плоских нагревателей наиболее важными характеристиками являются обеспечение равномерного нагрева по площади нагревателя и быстрый выход на заданную температуру. Поэтому в данной работе эти характеристики были подробно исследованы на различных стадиях нагрева.

На рисунке 1 представлены термограмма лицевой поверхности нагревателя (Рис.1 а) и профиль распределения температуры вдоль заданной линии, пересекающей нагреватель из углеродной нити (Рис.1 б) на 5 с нагрева.

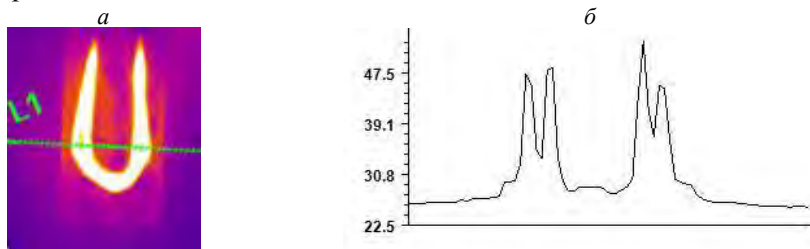


Рис. 1 Термограмма лицевой поверхности нагревателя из алюминия с пористым оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (б) вдоль заданной линии на 5 с нагрева

В то же самое время рабочая (теплоотдающая) сторона нагревателя, как видно из термограммы поверхности нагревателя (Рис.2 а) и профиля распределения температуры вдоль заданной линии (Рис.2 б), имеет равномерное распределение температуры по поверхности со средней температурой 51,2 °С.

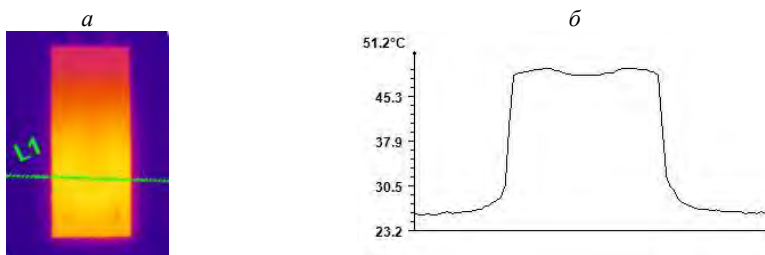


Рис. 2 Термограмма рабочей (теплоотдающей) поверхности нагревателя из алюминия с пористым оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (б) вдоль заданной линии на 5 с нагрева

Равномерное распределение температуры по поверхности при достижении температуры 170 °С сохранялось. Получены зависимости изменения температуры во времени на поверхности нагревателя с резистивным элементом и на обратной стороне (теплоотдающей). Результаты исследований показывают, что температура на поверхности

нагревателя с резистивным элементом и на обратной стороне имеют очень близкие значения на всех стадиях нагрева. Следовательно, благодаря высокой теплопроводности алюминия генерируемое тепло успевает равномерно рассеиваться по всему объему алюминия, обеспечивая равномерный профиль распределения температуры по поверхности как на лицевой, так и на обратной стороне нагревателя.

4. Заключение

Плоский электронагреватель на основании из анодированного алюминия характеризуется быстрым выходом на максимальную рабочую температуру и достигает температуры 200 °С за время 60 с (мощность 13,5 Вт). Несмотря на односторонний нагрев с использованием линейчатого нагревательного элемента из углеродной нити на всех этапах нагрева на обратной (теплоотводящей) стороне нагревателя обеспечивался равномерный профиль распределения температуры по поверхности. Применение силиконового компаунда в качестве герметизирующего полимера позволило повысить верхнюю рабочую температуру плоского алюминиевого нагревателя до 200 °С.

Список литературы

1. Врублевский, И., Чернякова, К., Видеков В., Тучковский А. Сравнительный анализ работы плоского нагревательного элемента на основании из анодированного алюминия // XXIV МНТК “АДП 2015”, Созопол, Болгария. сб. материалов докладов. 2015. С. 422–428.
2. Vrublevsky, I.; Charnyakova, K.; Videkov, V.; Tuchkovsky, A. Improvement of the thermal characteristics of the electric heater in the architecture with aluminum, nanoporous alumina and resistive component of carbon fiber // Nanoscience & Nanotechnology. 2016. № 1. С.1–2.

Optical properties and dynamics of nanosized aluminium films

Starostenko V.V., Mazinov A.S., Shevchenko A.I., Fitaev I.Sh.,
Borsuk A.S.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University
Simferopol, 295007, Russian Federation
fotoenergy@gmail.com

Abstract: The paper considers the formation of aluminium films deposited by ion sputtering on glass and lavsan substrates. The organization and profiles of structures with conducting films of thickness from 1 to 10 nm have been considered. The investigations were carried out using interference microscope and atomic force microscope. Transmission and reflection spectra of aluminium films with thickness from 1 to 50 nm are presented.

Keywords: nanosized particles, ion sputtering, surface topography, atomic force microscopy, visible spectral range, infrared spectral range, transmission and reflection spectra.

Оптические свойства и динамика наноразмерных плёнок алюминия

Старостенко В.В., Мазинов А.С., Шевченко А.И., Фитаев И.Ш.,
Борсук А.С.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
fotoenergy@gmail.com

Аннотация: В работе рассмотрено формирование алюминиевых плёнок, осаждённых ионным распылением на стеклянные и лавсановые подложки. Рассмотрены организация и профили структур с проводящими плёнками толщиной от 1 до 10 нм. Исследования проводились с применением интерференционного и атомно-силового микроскопов. Приведены спектры пропускания и отражения алюминиевых плёнок толщиной от 1 до 50 нм.

Ключевые слова: наноразмерные плёнки, ионное распыление, рельеф поверхности, атомно-силовая микроскопия, видимый спектральный диапазон, инфракрасный спектральный диапазон, спектры пропускания и отражения.

1. Введение

В настоящее время наноразмерные металлические плёнки представляют научный и практический интерес. При таких малых толщинах многие свойства, в том числе структурные, оптические, проводящие, отличаются значительным образом по сравнению со свойствами плёнок большей толщины [1—4]. Среди важных исследований металлических плёночных структур следует отметить изучение рельефа поверхности, спектральных характеристик, проводимости, СВЧ-измерения и др. [3, 5—9].

В данной работе приводятся изображения рельефа поверхности и спектры коэффициентов пропускания и отражения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах для нанометровых плёнок алюминия. Данные плёнки были получены методом ионного распыления. Толщины плёночных структур определялись временами напыления.

2. Исследование рельефа поверхности

Первичное исследование поверхности получаемых плёнок осуществлялось с применением интерференционного микроскопа. Поверхность плёнок лишь в некоторой степени равномерна, наблюдаются неоднородности. На рис. 1 представлены микрофотографии для плёнок алюминия на лавсановых подложках. На поверхности плёнок алюминия толщиной 1 и 7 нм встречаются включения отдельных структур размерами в несколько мкм.

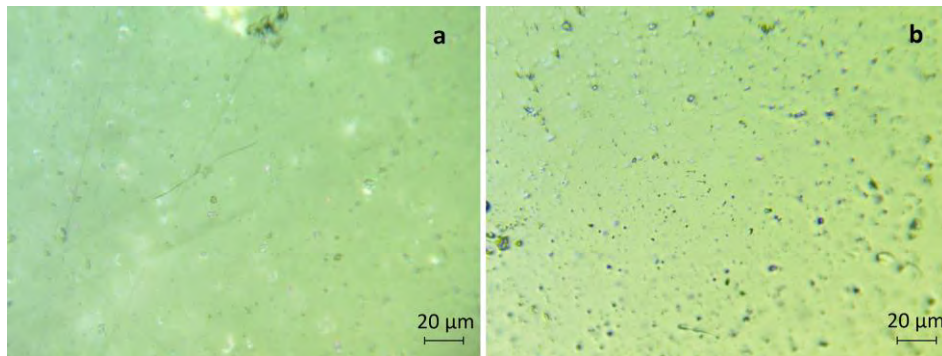


Рис. 1. Микрофотографии плёнок толщиной 1 (а) и 7 нм (б), полученные с помощью интерференционного микроскопа

Fig. 1. The photomicrographs of films of thickness 1 (a) and 7 (b) nm obtained by means of an interference microscope

Следующим этапом было рассмотрение рельефа поверхности плёночных структур и оценка её неровности применением атомно-силовой микроскопии [7]. В целом можно отметить, что для поверхности плёнок алюминия на стекле различной толщины перепады по высоте составляют 2—4 нм с отдельными выступами высотой до 22 нм и длиной в десятки — сотни нм (рис. 2).

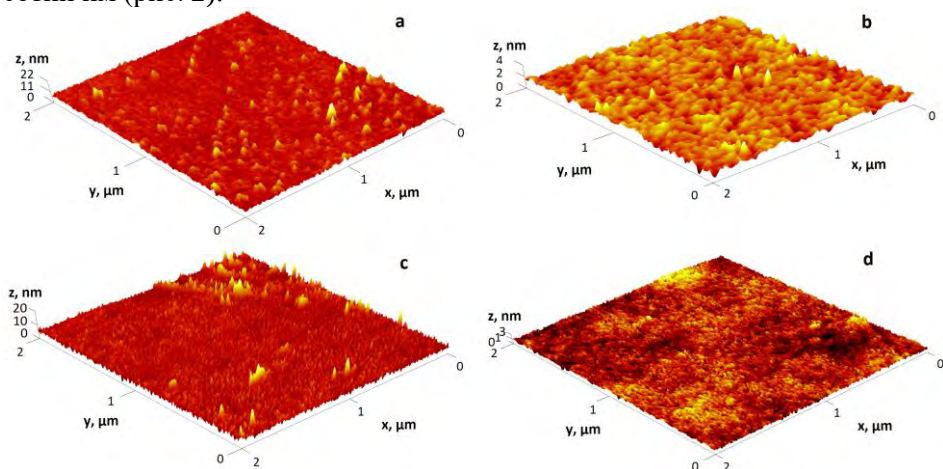


Рис. 2. АСМ изображение поверхности плёнок алюминия толщиной 1 (а), 3 (б), 7 (с) и 10 (д) нм при площади сканирования в 2×2 мкм

Fig. 2. AFM image of the surface of aluminium films 1 (a), 3 (b), 7 (c) and 10 (d) nm thick at the scanning area of 2×2 μm

3. Спектры коэффициентов пропускания и отражения

Спектры коэффициента пропускания нанометровых плёнок алюминия на стеклянной поверхности (с учётом пропускания стекла), естественно, показали уменьшение коэффициента при увеличении толщины плёнок. При этом стоит отметить, что плёнки алюминия толщиной 3 и, особенно, 1 нм практически прозрачны в видимом диапазоне.

С увеличением длины волны коэффициент пропускания медленно снижается (рис. 3). Особенно явно данная зависимость прослеживается для плёнок толщиной 3 нм и более. В целом плёнки алюминия толщиной 1 и 3 нм оптически прозрачны в видимом диапазоне при коэффициенте пропускания более 48% на всём интервале 400—1100 нм. Для плёнок толщиной 10 нм коэффициент пропускания составляет уже менее 5% при 500—1100 нм.

Коэффициент отражения для плёночных алюминиевых структур нанометровой толщины, напротив, слегка увеличивается с увеличением длины волны.

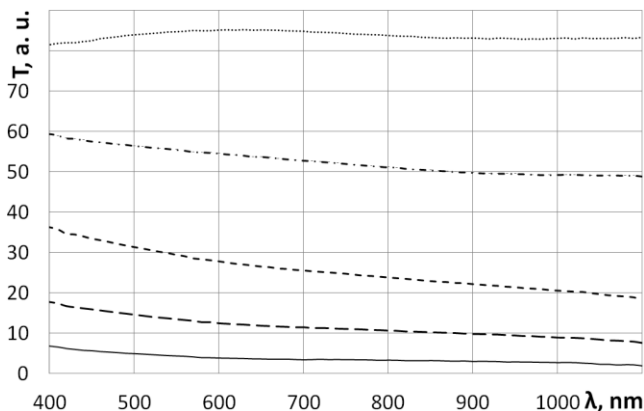


Рис. 3. Усреднённые спектры пропускания плёнок алюминия толщиной 1 нм (· ·), 3 нм (- · -), 5 нм (- - -), 7 нм (- - - -) и 10 нм (сплошная линия)

Fig. 3. Averaged transmission spectra of aluminium films 1 nm (· ·), 3 nm (- · -), 5 nm (- - -), 7 nm (- - - -) and 10 nm thick (solid line)

4. Заключение

Проведённые исследования показывают, что структура поверхности подложек пространственно неоднородна на наноуровне, аналогично неоднородными являются структуры проводящих плёнок при их толщинах до 10 нм. Структуры с плёнками до 5 нм практически прозрачны в оптическом диапазоне при используемых подложках и методе напыления.

Приведены оценки высоты и размеров неоднородностей на поверхности плёночных структур. Коэффициент пропускания с увеличением длины волны падающего излучения в исследуемой области спектра снижается, в то время как отражения — возрастает.

Список литературы

- [1] Zhou T., Gall D. Resistivity scaling due to electron surface scattering in thin metal layers // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. No. 16. Art. no. 165406.
- [2] Abdellaoui N., Pereira A., Novotny M., Bulir J., Fitl P., Lancok J., Moine B., Pillonnet A. In situ monitoring of electrical resistance during deposition of Ag and Al thin films by pulsed laser deposition: Comparative study // Appl. Surf. Sci. 2017. V. 418. P. 517–521.

[3] Арсеничев С.П., Григорьев Е.В., Зуев С.А., Старостенко В.В., Таран Е.П. Механизмы воздействия электромагнитных полей на проводящие пленочные структуры микросхем // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 5. С. 1-11.

[4] Matsuda I., Tanikawa T., Hasegawa S., Yeom H.W., Tono K., Ohta T. Quantum-well states in ultra-thin metal films on semiconductor surfaces // e-J. Surf. Sci. Nanotech. 2004. V. 2. P. 169-177.

[5] Lin H., Xu S., Wang X., Mei N. Thermal and electrical conduction in ultrathin metallic films: 7 nm down to sub-nanometer thickness // Small. 2013. V. 9. No. 15. P. 2585-2594.

[6] Андреев В.Г., Вдовин В.А., Пронин С.М., Хорин И.А. Измерение оптических коэффициентов нанометровых металлических пленок на частоте 10 ГГц // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 1-15.

[7] Арсеничев С.П., Глумова М.В., Григорьев Е.В., Зуев С.А., Старостенко В.В., Таран Е.П. / Влияние структуры подложек на поглощающие свойства нанометровых проводящих пленок // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). Севастополь. 2017. С. 972-978.

[8] Li T., Suo Z. Deformability of thin metal films on elastomer substrates // Int. J. Solids Struct. 2006. V. 43. P. 2351-2363.

[9] Суровой Э.П., Власова Ю.Ю., Сирик С.М. Изменения оптических свойств наноразмерных слоев никеля в процессе термообработки // Ползуновский вестник. 2013. № 1. С. 110-114.

References

[1] Zhou T., Gall D. Resistivity scaling due to electron surface scattering in thin metal layers. *Phys. Rev. B.*, 2018, vol. 97, no. 16, art. no. 165406.

[2] Abdellaoui N., Pereira A., Novotny M., Bulir J., Fitl P., Lancok J., Moine B., Pillonnet A. In situ monitoring of electrical resistance during deposition of Ag and Al thin films by pulsed laser deposition: Comparative study. *Appl. Surf. Sci.*, 2017, vol. 418, pp. 517 - 521.

[3] Arsenichev S.P., Grigor'ev E.V., Zuev S.A., Starostenko V.V., Taran E.P. [Mechanisms of influence of electromagnetic fields on conductive film structures of microcircuits]. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 5, pp. 1 - 11 (In Russian).

[4] Matsuda I., Tanikawa T., Hasegawa S., Yeom H.W., Tono K., Ohta T. Quantum-well states in ultra-thin metal films on semiconductor surfaces. *e-J. Surf. Sci. Nanotech.*, 2004, vol. 2, pp. 169 - 177.

[5] Lin H., Xu S., Wang X., Mei N. Thermal and electrical conduction in ultrathin metallic films: 7 nm down to sub-nanometer thickness. *Small*, 2013, vol. 9, no. 15, pp. 2585 - 2594.

[6]. Andreev V.G., Vdovin V.A., Pronin S.M., Khorin I.A. [Measurement of the optical coefficients of nanometer metal films at a frequency of 10 GHz]. *Journal of Radio Electronics*, 2017, no. 11, pp. 1 - 15 (In Russian).

[7] Arsenichev S.P., Glumova M.V., Grigoriev E.V., Zuev S.A., Starostenko V.V., Taran E.P. [The influence of substrate structure on the absorbing properties of nanometer conductive films]. 27th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2017), Sevastopol, 2017, pp. 972 - 978 (In Russian).

[8] Li T., Suo Z. Deformability of thin metal films on elastomer substrates. *Int. J. Solids Struct.*, 2006, vol. 43, pp. 2351 - 2363.

[9] Surovoy E.P., Vlasova Yu.Yu., Sirik S.M. [Changes in the optical properties of nanodimensional nickel layers during heat treatment]. *Polzunovsky vestnik*, 2013, no. 1, pp. 110 - 114 (In Russian).

Возможности псевдолегирования фуллеренов аморфным углеродом

Мазинов А.С., Гурченко В.С., Тютюник А.С., Карпенко Н.И.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского

г. Симферополь, 295007, Российская Федерация

mazinovas@cfuv.ru

Аннотация: *Исследован углеродный композитный материал, полученный на основе фуллерена и фуллереносодержащего материала на предмет направленного изменения рабочего сопротивления. Фуллерен получен методом распыления графита. В качестве псевдолегирующей примеси был использован фуллереносодержащий материал, полученный методом низкотемпературного крекинга с относительным содержанием C_{60} порядка 2,5%. Диапазон относительных содержаний наноструктурированной фазы составил 2—25%. Диапазон измерения температуры составил 5—100 °C.*

Ключевые слова: фуллереносодержащий материал, фуллерен C_{60} , углерод, композит, проводимость.

1. Введение

Более пяти тысяч органических структур, базирующихся на различных формах углерода, уже сегодня рассматриваются как материалы, дающие возможность значительно расширить гамму современных электронных устройств [1]. Подобные структуры считаются перспективными во многих направлениях, например, в пассивных поглощающих покрытиях и в активных квантовых приборах, приемных и излучающих устройствах [2]. Другими словами, многообразие углеродных структур в сочетании с преимуществом компиляции и самоорганизации органики позволит сделать новый прорыв в электронике будущего. В дополнение стоит отметить, что карбоновые компоненты применяются в качестве композитных материалов, позволяющих улучшить такие свойства, как модуль упругости, электрическую проводимость и уменьшить силу трения [3].

2. Постановка эксперимента

Для удобства проведения эксперимента было принято решение использовать обратное псевдолегирование, т.е. материал с малым содержанием кристаллической фазы постепенно обогащался наноструктурирован-

ным C_{60} . Это было обусловлено высоким сопротивлением чистого фуллерена и сложностью точной фиксации заданного уровня аморфной примеси.

Для замеров сопротивлений при плавном изменении фазового состава была изготовлена четырехконтактная измерительная площадка, интегрированная в кварцевую кювету. В качестве жесткого изолирующего основания был выбран фольгированный текстолит. Медные контактные площадки были расположены на расстоянии 2 мм и 1 мм (рис. 1), это позволило рассматривать изменение линейного сопротивления от длины токового канала.

Кварцевая кювета фиксировалась при помощи олигомеров, под действием полиаминов, что придавало выбранному химическому соединению устойчивость к разложению под действием бензола.

Далее фуллеренсодержащий материал суспензировался в бензоле и дозированно помещался в подготовленную кювету. После испарения бензола и выдерживания заготовки при комнатной температуре до постоянной массы производились измерения электрических характеристик полученного образца. Повышение концентрации фуллеренов осуществлялось порционным добавлением бензольного раствора C_{60} . На каждом шаге доза наноструктурированной фазы в образцах увеличивалась на 1 мг.

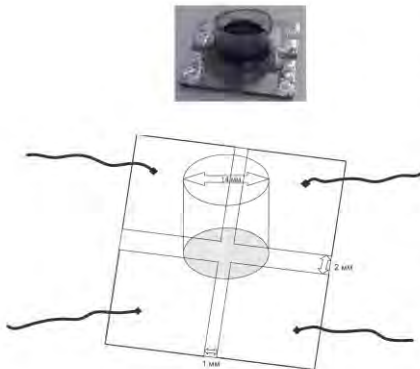


Рис. 1. Структурная схема образца

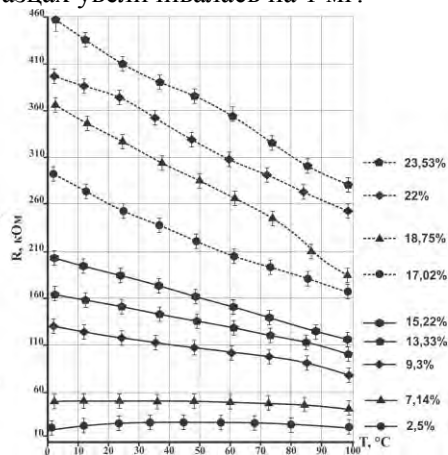


Рис. 2. Сводная температурная зависимость

Контактная площадка фиксировалась на держателе, который позволял поочередно или синхронно подключать тестовые образцы к измери-

тельным приборам. Измерения производились путем фиксации исследуемых образцов специализированными зажимными контактами. После фиксации образец подвергался температурным изменениям путем нагревания до 100 °С и охлаждения до 5 °С.

3. Полученные результаты

Первичный оптический анализ полученных пленок показал достаточную однородность структуры в целом. Снятие вольтамперных характеристик и стационарной проводимости проводились последовательно. Характеристики снимались попарно с противоположных контактов на четырехконтактной площадке. После каждого увеличения концентрации фуллеренов образец нагревали до 100 °С и охлаждали до 5 °С.

Молекулярные кристаллы C_{60} , которые характеризуются шириной запрещенной зоны $E_g = 1.5\text{--}2.3$ эВ, считаются, как известно, полупроводниками n -типа, однако практически это диэлектрики, у которых удельное сопротивление $\rho \sim 10^6\text{--}10^7$ Ом · см. С ростом степени беспорядка ρ возрастает. Во всех случаях в воздушной среде (т. е. при контакте с кислородом) ρ увеличивается на три-шесть порядков и более, достигая значений 10^{14} Ом · см.

К тому же стоит заметить, что отсутствие монокристалличности материала и наличие пористости приводит к относительно большому доверительному интервалу измерений. На рис. 2 изображена полная картина зависимости электропроводности от температуры при изменении концентрации фуллеренов от 2,5% до 25%.

При общем анализе изменения линейного сопротивления при псевдолегировании можно видеть монотонный рост. К тому же изменение концентрации нанокристаллической фазы в фуллеренсодержащем материале дает достаточно большой разброс в сопротивлении, который лежит от десятков Ом до сотен кОм (рис. 2).

Для более подробного анализа стоит выделить две группы характеристик. Первая — с относительно малой концентрацией C_{60} (от 2,5 % до 11,36%), вторая — с большей концентрацией (от 13,33% до 25%). При малых концентрациях фуллеренов в ФСМ сопротивление в зависимости от температуры вначале поднимается, после чего начинает уменьшаться (рис. 3). Нужно отметить, что скорость увеличения сопротивления с ростом температуры заметно уменьшается при увеличении концентрации C_{60} , а пик перегиба постепенно сглаживается. Так, при концентрации 11,36% участок металлической проводимости, т.е. увеличение сопротив-

ления с ростом температуры, исчезает, а температурная зависимость сопротивления носит монотонный убывающий характер (рис. 3).

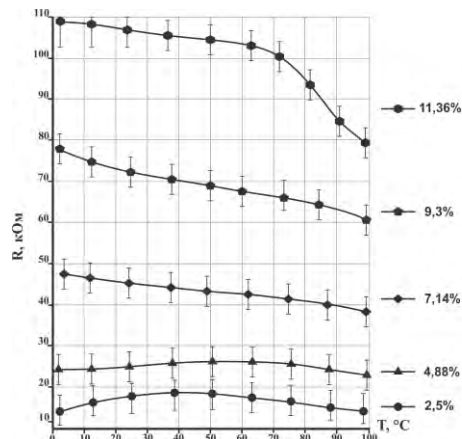


Рис. 3. Электрические характеристики композитов при удельной концентрации C_{60} от 2,5 % до 11,36%

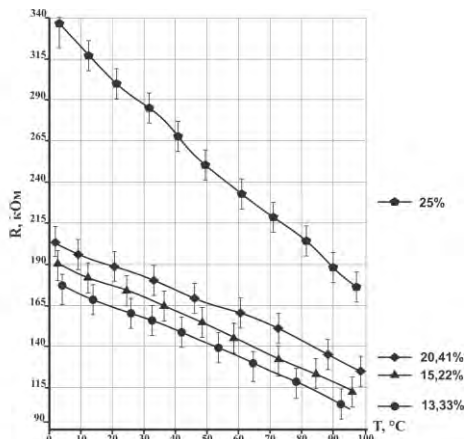


Рис. 4. Электрические характеристики композитов при удельной концентрации C_{60} от 13,33% до 25%

Температурные зависимости сопротивления пленок при концентрации C_{60} от 13,33% до 25% показали плавное уменьшение сопротивления с увеличением температуры (рис. 4). Также видно, что с ростом доли фуллеренов уменьшается электропроводность и, как отмечалось выше, большой разброс параметров, объясняемый высокой пористостью образцов.

В заключении приведенного анализа необходимо добавить наличие заметной чувствительности исследуемых материалов к неконтролируемым внешним факторам, которая обусловлена абсорбционными свойствами фуллеренсодержащего материала [4].

4. Заключение

При увеличении температуры и изменении концентрации C_{60} наблюдаются характеристики, свойственные полупроводникам, что дает возможность говорить о перспективности использования C_{60} при псевдолегировании ФСМ. Это, в свою очередь, позволит значительно расширить возможности конструкторских решений по созданию новых полупроводниковых приборов.

Обобщая температурные характеристики сопротивлений, особо стоит отметить изменение характера проводимости в зависимости от концентрации. Более того, является достаточно интересным тот факт, что при малых концентрациях C_{60} в ФСМ рабочие пленки обладали двумя характерами проводимости. Это позволяет говорить о преобладании одного механизма проводимости над другим. То есть при малых концентрациях фуллерена в ФСМ или его отсутствии вообще рост сопротивления связан с уменьшением подвижности носителей заряда при увеличении температуры. В свою очередь уменьшение подвижности обусловлено увеличением температурных колебаний дефектных атомов, что приводит к увеличению рекомбинации носителей заряда. При больших концентрациях фуллереновой фазы материал начинает вести себя подобно полупроводнику, у которого с увеличением температуры возрастает генеративная способность.

Полученные в работе разбросы параметров, лежащие в допустимом диапазоне (порядка 25%), позволяют говорить о возможном дальнейшем получении стабильных приборных элементов на основе наноструктурированного углерода.

Список литературы

- [1] Юре Т.А., Рудая Л.И., Климова Н.В., Шаманин В.В. Органические материалы для фотовольтаических и светоизлучающих устройств // ФТП. 2003. Т.60. №.7. С. 835-844.
- [2] Мазинов А.С., Орленсов В.Б., Шевченко А.И. Возможность применения трансфер-матриц для расчета наноструктурированных систем // Материалы 26-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымКо'2016)». Изд-во Вебер. 2016. С. 1568-1573.
- [3] Работягов К.В., Сай Е.В., Максимова Е.М., Наухацкий И.А., Карпенко Н.И., Шевченко А.И., Мазинов А.С. Исследование структуры и физико-химических свойств пористых углеродных материалов, полученных низкотемпературным крекингом // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия», 2015. Т. 1 (67). № 3. С. 125-131.
- [4] Работягов К.В. Сорбционные свойства утилизированного технического углерода // II Международная конференция к 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского. Севастополь, 2013. С. 320.

Investigation of the Ni catalytic centers influence on the memristor effect of vertically aligned carbon nanotubes

¹Il'ina M.V., ¹Il'in O.I., ¹Rudyk N.N., ²Ageev O.A.

¹Southern Federal University, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Electronic Equipment Engineering
Taganrog, 347922, Russian Federation
mailina@sfedu.ru

² Southern Federal University, Research and Education Center "Nanotechnologies"
Taganrog, 347922, Russian Federation
ageev@sfedu.ru

Abstract: The results of experimental studies of the Ni catalyst centers influence on the memristor effect of vertically aligned carbon nanotubes by EXAFS-spectroscopy and atomic force spectroscopy are presented. It is shown that the manifestation of the memristor effect is due to the properties of carbon nanotubes, while the Ni catalytic centers can enhance this effect due to the destruction of the nanotube structure near its top. The results can be used to create nonvolatile memory elements based on carbon nanotubes, which exceed the currently existing elements in speed, scalability and energy efficiency.

Keywords: nanoelectronics, carbon nanotubes, memristor effect, nonvolatile memory.

Исследование влияния каталитических центров Ni на мемристорный эффект вертикально ориентированных углеродных нанотрубок

¹Ильина М. В., ¹Ильин О. И., ¹Рудык Н. Н., ²Агеев О. А.

¹Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
Таганрог, 347922, Россия
mailina@sfedu.ru

²Южный федеральный университет, научно-образовательный центр «Нанотехнологии»
Таганрог, 347922, Россия
ageev@sfedu.ru

Аннотация: *Представлены результаты экспериментальных исследований влияния каталитических центров Ni на мемристорный эффект вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методами рентгеновской спектроскопии поглощения и атомно-силовой спектроскопии. Показано, что проявление мемристорного эффекта обусловлено свойствами углеродных нанотрубок, при этом каталитические центры Ni могут усиливать данный эффект за счет нарушения структуры нанотрубок вблизи ее вершины. Полученные результаты могут быть использованы при создании элементов энергонезависимой памяти на основе углеродных нанотрубок, превосходящие существующие элементы по быстродействию, масштабируемости и энергоэффективности.*

Ключевые слова: наноэлектроника, углеродные нанотрубки, мемристорный эффект, энергонезависимая память.

1. Введение

Исследования последних лет показали, что вертикально ориентированные углеродные нанотрубки (УНТ) проявляют воспроизводимый мемристорный эффект, который может быть использован для разработки и создания перспективных элементов памяти [1–7]. Как было установлено нами ранее, мемристорный эффект связан с неравномерной деформацией и проявлением пьезоэлектрических свойств УНТ [4, 5, 8–10]. При этом проявление пьезоэлектрических свойств УНТ возможно только при нарушении ее центросимметричной структуры, в том числе из-за наличия каталитических центров на вершинах УНТ [4, 8]. Однако остается открытым вопрос о возможности влияния самих каталитических центров Ni на мемристорный эффект.

Целью данной работы является исследование влияния каталитических центров Ni на мемристорный эффект вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методами рентгеновской спектроскопии поглощения и атомно-силовой спектроскопии.

2. Объекты исследований и методика эксперимента

Объектом исследований является массив вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, выращенный методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) [11–13]. Рост массива осуществлялся на подложке Si(100) с нанесенными методом магнетронного распыления барьерным (Ti) и каталитическим (Ni) слоями толщинами 20 и 10 нм, соответственно. Для образования каталитических центров Ni из сплошной пленки каталитического слоя подложка нагревалась до температуры 750 °C за 20 минут в атмосфере аргона (40 sccm) и аммиака (15

сстм) при давлении 4,5 Торр. Затем проводилось выращивание вертикально ориентированных углеродных нанотрубок по вершинному механизму в течение 15 минут. Предварительная оценка геометрических параметров УНТ проводилась с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Nova NanoLab 600 (FEI, Нидерланды) и показала, что диаметр и длина УНТ составили 108 ± 39 нм и $2,23 \pm 0,37$ мкм, соответственно.

Исследования фазового состава структуры каталитических центров Ni проводились методом рентгеновской спектроскопии поглощения (EXAFS-спектроскопии) на специализированном источнике синхротронного излучения (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия). Полученные рентгеновские спектры поглощения сравнивались со спектрами эталонных образцов.

Удаление каталитических центров Ni с вершин УНТ выполнялось методом фокусированных ионных пучков (ФИП) галлия с использованием Nova NanoLab 600. На рисунке 1 представлены РЭМ-изображения областей массива УНТ до и после модификации.

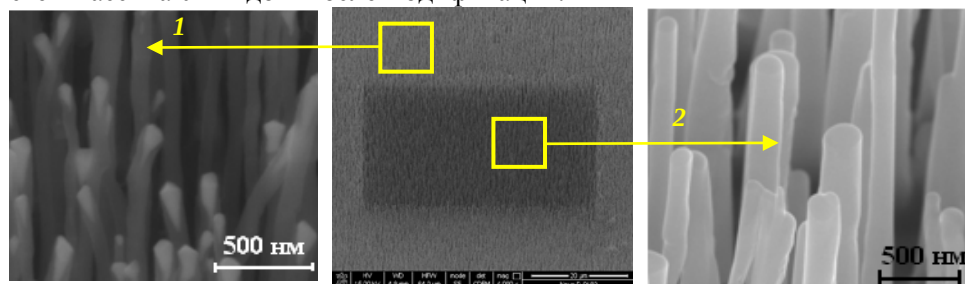


Рис. 1. РЭМ-изображения массива вертикально ориентированных УНТ до (1) и после (2) травления каталитических центров Ni.

Fig. 1. SEM images of the vertically aligned carbon nanotube array to (1) and after (2) etching of the Ni catalytic centers.

Экспериментальные исследования мемристорного эффекта УНТ до и после удаления каталитических центров проводились методом атомно-силовой микроскопии в режиме токовой спектроскопии при приложении пилообразных импульсов напряжения амплитудой ± 10 В с использованием зондовой нанолaborатории Ntegra (НТ-МДТ, г. Москва, Россия). В качестве верхнего электрода использовался кремниевый зонд с платиновым покрытием марки NSG10/Pt.

3. Результаты исследований и обсуждения

Результаты исследований фазового состава структуры каталитических центров методом EXAFS-спектроскопии показали, что после процесса роста УНТ в вершинах содержатся центры, состоящие на 95% из чистого никеля (Рис. 2). Этот факт позволяет сделать вывод, что сами по себе каталитические центры Ni не могут являться источником мемристорного эффекта, т.к. данный эффект наблюдается только в окислах металлов [14].

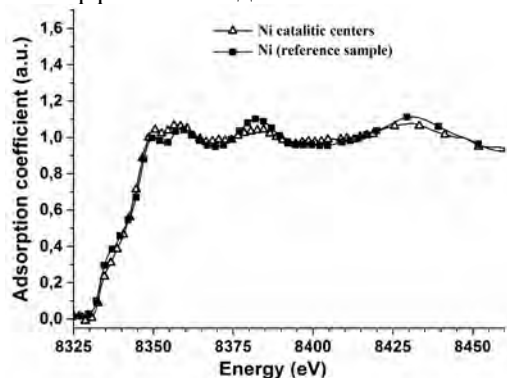


Рис. 2. Рентгеновские спектры поглощения чистого Ni и каталитических центров Ni в вершинах УНТ.

Fig. 2. EXAFS spectra of the Ni reference sample and the Ni catalytic centers in CNT tops.

На рис. 3а, б показаны результаты исследований мемристорного эффекта УНТ до и после удаления каталитических центров Ni, соответственно. Видно, что после удаления каталитических центров эффект сохраняется, а соотношение сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях увеличивается до 48 (Рис. 3б). Наблюдаемая зависимость может быть связана с созданием дополнительных дефектов и «разбуханием» нанотрубки (Рис. 1) в процессе травления каталитических центров ионами галлия и, как следствие, усилением ее пьезоэлектрических свойств.

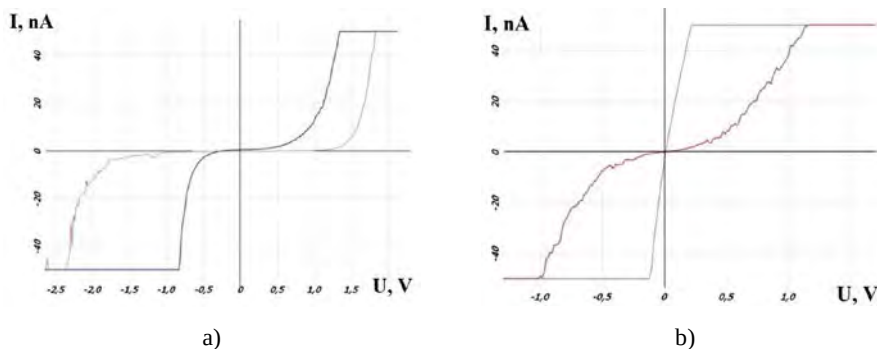


Рис. 3. Вольтамперные характеристики УНТ: а) до (а) и после (б) удаления каталитических центров Ni методом ФИП.

Fig. 3. Current-voltage characteristics of CNT: a) to (a) and after (b) etching of the Ni catalytic centers by FIB method.

Таким образом, можно сделать вывод, что наличие каталитических центров Ni в вершинах вертикально ориентированных углеродных нанотрубок не является обязательным условием проявления мемристорного эффекта, а служит только источником дефектов структуры УНТ, которые приводят к усилению ее пьезоэлектрических свойств [8].

4. Заключение

Таким образом, в работе экспериментально доказано, что каталитические центры в вершинах УНТ на 95% являются чистым никелем и не могут выступать источником мемристорного эффекта. Кроме того, удаление каталитических центров Ni с вершин УНТ не только не приводит к исчезновению эффекта, но и усиливает его, что связано с созданием дополнительных дефектов в структуре УНТ в процессе ее травления. Полученные результаты коррелируют с ранее проведенными исследованиями и предложенным механизмом мемристорного переключения УНТ [4–10].

Полученные результаты могут быть использованы при создании и разработке перспективных энергонезависимых элементов памяти на основе мемристорных структур с использованием вертикально ориентированных углеродных нанотрубок.

Результаты получены с использованием оборудования НОЦ и ЦКП «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-29-14023 офи_м и № 18-32-00652 мол_а).

Список литературы

- [1] Li L., Wen D. Memory behavior of multi-bit resistive switching based on multiwalled carbon nanotubes // *Org. Electron. Physics, Mater. Appl.* 2016. Vol. 34. P. 12–17.
- [2] Bandaru P.R. Electrical Properties and Applications of Carbon Nanotube Structures // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2007. Vol. 7. P. 1239–1267.
- [3] De Volder M.F.L., Tawfick S.H., Baughman R.H., Hart A.J. Carbon nanotubes: present and future commercial applications // *Science*. 2013. Vol. 339. P. 535–9.
- [4] Il'ina M.V., Il'in O.I., Blinov Yu.F., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S., Fedotov A.A., Konoplev B.G., Ageev O.A. Memristive switching mechanism of vertically aligned carbon nanotubes // *Carbon*. 2017. V. 123. P. 514–524.
- [5] Il'ina M.V., Il'in O.I., Rudyk N.N., Konshin A.A., Ageev O.A. The memristive behavior of non-uniform strained carbon nanotubes // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2018. Т. 9. № 1. С. 76–78.
- [6] Ageev O.A., Блинов Ю.Ф., Ильин О.И., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А. Исследование резистивного переключения вертикально ориентированной углеродной нанотрубки методами сканирующей зондовой микроскопии // *Физика твердого тела*. 2015. №4. С. 807–813.
- [7] Ageev O.A., Блинов Ю.Ф., Рубашкина М.В., Смирнов В.А. Элемент памяти на основе вертикально ориентированных углеродных нанотрубок // *Патент на полезную модель* RU 160315, дата приоритета 05.05.2015 г.
- [8] Il'ina M.V., Il'in O.I., Blinov Y.F., Konshin A.A., Konoplev B.G., Ageev O.A. Piezo-electric Response of Multi-Walled Carbon Nanotubes // *Materials*. 2018. Vol. 11. P. 638.
- [9] Ageev O.A., Blinov Yu.F., Ilina M.V., Ilin O.I., Smirnov V.A. Modeling and experimental study of resistive switching in vertically aligned carbon nanotubes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 741, N. 1. P. 012168.
- [10] Ильина М.В., Блинов Ю.Ф., Ильин О.И., Гурьянов А.В., Ageev O.A., Модель эффекта резистивного переключения в неравномерно деформированной углеродной нанотрубке // *Известия РАН. Серия физическая*. 2017. Т. 81, № 12. С. 1681–1685.
- [11] Shah K.A., Tali B.A. Synthesis of carbon nanotubes by catalytic chemical vapour deposition: A review on carbon sources, catalysts and substrates // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2016. Vol. 41. P. 67–82.
- [12] Il'in O.I., Il'ina M.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Ageev O.A. The growth temperature effect on vertically aligned carbon nanotubes parameters // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2018. Т. 9. № 1. С. 92–94.
- [13] Il'in O.I., Il'ina M.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Levshov D.I., Ageev O.A. The influence of activation and growth time on the geometry and structural perfection of multi-walled carbon nanotubes // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 1038. P. 012062.
- [14] Akinaga H., Shima H. Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides // *Proceedings of the IEEE*. 2010. Vol. 98 (12). P. 2237–2251.

References

- [1] Li L., Wen D. Memory behavior of multi-bit resistive switching based on multiwalled carbon nanotubes // *Org. Electron. Physics, Mater. Appl.*, 2016, vol. 34, pp. 12–17.
- [2] Bandaru P.R. Electrical Properties and Applications of Carbon Nanotube Structures // *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2007, vol. 7, pp. 1239–1267.
- [3] De Volder M.F.L., Tawfick S.H., Baughman R.H., Hart A.J. Carbon nanotubes: present and future commercial applications // *Science*, 2013, vol. 339, pp. 535–9.
- [4] Il'ina M.V., Il'in O.I., Blinov Yu.F., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S., Fedotov A.A., Konoplev B.G., Ageev O.A. Memristive switching mechanism of vertically aligned carbon nanotubes // *Carbon*, 2017, vol. 123, pp. 514–524.
- [5] Il'ina M.V., Il'in O.I., Rudyk N.N., Konshin A.A., Ageev O.A. The memristive behavior of non-uniform strained carbon nanotubes // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 76–78.
- [6] Ageev O.A., Blinov Yu.F., Il'in O.I., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Study of the Resistive Switching of Vertically Aligned Carbon Nanotubes by Scanning Tunneling Microscopy // *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 825–831.
- [7] Ageev O.A., Blinov Yu.F., Rubashkina M.V., Smirnov V.A. [Memory element based on vertically aligned carbon nanotubes] // *Patent RF RUS No. 160315. 05.05.2015.* (In Russian).
- [8] Il'ina M.V., Il'in O.I., Blinov Y.F., Konshin A.A., Konoplev B.G., Ageev O.A. Piezo-electric Response of Multi-Walled Carbon Nanotubes // *Materials*, 2018, vol. 11, pp. 638.
- [9] Ageev O.A., Blinov Yu.F., Ilina M.V., Ilin O.I., Smirnov V.A. Modeling and experimental study of resistive switching in vertically aligned carbon nanotubes // *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 741, no. 1, pp. 012168.
- [10] Il'ina M.V., Blinov Yu.F., Il'in O.I., Guryanov A.V., Ageev O.A. Model of Resistive Switching in a Nonuniformly Strained Carbon Nanotube // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2017, vol. 81, no. 12, pp. 1485–1489.
- [11] Shah K.A., Tali B.A. Synthesis of carbon nanotubes by catalytic chemical vapour deposition: A review on carbon sources, catalysts and substrates // *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2016, vol. 41, pp. 67–82.
- [12] Il'in O.I., Il'ina M.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Ageev O.A. The growth temperature effect on vertically aligned carbon nanotubes parameters // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2018, vol. 9, no. 1., pp. 92–94.
- [13] Il'in O.I., Il'ina M.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Levshov D.I., Ageev O.A. The influence of activation and growth time on the geometry and structural perfection of multi-walled carbon nanotubes // *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 1038, pp. 012062.
- [14] Akinaga H., Shima H. Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides // *Proceedings of the IEEE*, 2010, vol. 98, no. 12, pp. 2237–2251.

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR according to the research projects No.16-29-14023 ofi_m, No.18-32-00652 mol_a.

Development of the catalytic centers formation model for carbon nanotubes growth from metal nanosized continuous films in the Ni/Cr/Si structure

¹Ильин О.И., ¹Ильина М.В., ¹Рудык Н.Н., ¹Федотов А.А.

¹ Southern Federal University
Taganrog, 347922, Russian Federation
oiilin@sfnedu.ru

Abstract: Developed physico-mathematical model of the catalytic centers formation model for carbon nanotubes growth from metal nanosized continuous films in the Ni/Cr/Si structure, taking into account of the arising stresses influence in the substrate, due to the thickness over heating gradient the and the influence of stresses in metal/substrate interface. It is shown that after the tearing of the film, surface processes and specific surface energy are the dominant factor controlling the formation of the catalytic center. Dependences of the diameter and height of the catalytic centers on the contact angle are calculated, at annealing temperatures of 700, 750, and 800 °C.

Keywords: catalytic centers, carbon nanotubes, plasma enhanced chemical vapor deposition.

Разработка модели образования каталитических центров роста углеродных нанотрубок из сплошных наноразмерных пленок металла в структуре Ni/Cr/Si

¹Ильин О.И., ¹Ильина М.В., ¹Рудык Н.Н., ¹Федотов А.А.

¹Южный федеральный университет
г. Таганрог, 347928, Российская Федерация
oiilin@sfnedu.ru

Аннотация: Разработана физико-математическая модель каталитических центров роста углеродных нанотрубок из сплошных наноразмерных пленок металла в структуре Ni/Cr/Si, с учетом влияния напряжений, возникающих в подложке, за счет градиента нагрева по толщине и с учетом влияния напряжений, возникающих на границе металл/подложка. Показано, что после разрыва пленки, доминирующим фактором, контролирующим формирование каталитического центра, являются поверхностные процессы и удельная поверхностная энергия. Рассчитаны

зависимости диаметра и высоты КЦ от краевого угла, при температурах отжига 700, 750 и 800 °С.

Ключевые слова: каталитические центры, углеродные нанотрубки, плазмохимическое осаждение из газовой фазы.

1. Введение

Практическое использование уникальных свойств углеродных нанотрубок (УНТ) приводит к необходимости получения ориентированных УНТ, расположенных в заданном месте подложки [1-3]. Одним из наиболее перспективных методов создания ориентированных УНТ является плазмохимическое осаждение из газовой фазы (ПХОГФ) [4]. Начальным этапом синтеза УНТ в методе ПХОГФ является формирование на подложке сплошного каталитического слоя, из которого, в результате отжига, формируются каталитические центры (КЦ) роста на основе переходных металлов [5]. После чего на поверхности КЦ осуществляется диссоциация молекул углеродсодержащего газа и транспортировка атомов углерода для роста УНТ. В связи с тем, что геометрические размеры, плотность расположения и состав КЦ определяют будущие свойства УНТ, актуальной является задача создания массивов КЦ с контролируемыми геометрическими параметрами. При этом, для исключения химического взаимодействия между материалом каталитического слоя (Ni, Fe, Co и т.д.) и кремниевой подложкой при отжиге, в структуре формируют барьерный слой на основе пленок металлов (Cr, V, Ti и т.д.).

Таким образом разработка модели образования каталитических центров роста углеродных нанотрубок из сплошных наноразмерных пленок металла в структуре Ni/Cr/Si, позволяющая прогнозировать параметры КЦ от режимов отжига является актуальной задачей.

2. Разработка модели

Для решения проблемы контролируемого формирования каталитических центров на кремниевой подложке была разработана модель и проведены теоретические оценки влияния режимов отжига структуры Ni/Cr/Si на размеры и плотность каталитических центров, с учетом механических напряжений возникающих в подложке и на контакте металл/подложка, а также с учетом взаимной диффузии материалов структуры и процессов сублимации КЦ.

При нагреве пленочных в структуре между слоя иницируется диффузионный массоперенос, в результате чего в объеме слоев и в

приконтактной области подложки меняется компонентный состав, а внешняя поверхность структуры меняет свой профиль. Диффузионный обмен через контакт двухслойной структуры достаточно изучен для структур, состоящих из пленок одного металла на подложке, однако обмен при отжиге многослойной структуры металлических пленок наноразмерной толщины при получении КЦ с контролируемыми геометрическими параметрами требует дополнительного исследования.

Существенное влияние на характер процессов массопереноса и морфологию многослойной структуры на подложке при отжиге оказывают также механические термоупругие напряжения, которые возникают из-за разностей коэффициентов термического расширения материалов подложки и металлических слоев. При этом, образующийся в результате нагрева градиент термонапряжений создает перепад химического потенциала по толщине пленочной структуры. Возникающий при этом перепад химического потенциала ($\Delta\mu$) будет инициировать диффузионный перенос вещества с внутренней, контактной плоскости на внешнюю поверхность пленки:

$$\Delta\mu = ((\alpha_{Si} - \alpha_{Cr}) \cdot E_{Cr} \cdot T - 2 \cdot \gamma \cdot K - n \cdot kT) \cdot \Omega, \quad (1)$$

где $\alpha_{Si,Cr}$ – коэффициент термического расширения (для соответствующего материала); E_{Cr} – модуль Юнга хрома; T – температура нагрева; K – локальная кривизна поверхности; γ – удельная поверхностная энергия хрома; n – число атомов в единице объема решетки металла; Ω – объем атома хрома.

Так как внутренняя поверхность пленки блокируется слоем силицида хрома, что исключает возможность свободно расширяться, внешняя поверхность начинает гофрироваться за счет выхода на поверхность диффундирующих атомов. Гофрированный профиль в последствии может фрагментироваться, образуя отдельные островки, составляющие в итоге основу для формирования КЦ на поверхности подложки.

Получено соотношение, определяющее зависимость радиуса КЦ от длительности отжига

$$t(R) = \frac{(R_0 - R)}{(\beta_D - \beta_C)} + \frac{\theta \cdot R_m}{(\beta_D - \beta_C)^2} \cdot \ln \left[\frac{R - \theta \cdot R_m}{R - \theta \cdot R_m} \right], \quad (2)$$

где $\theta = (\beta_D + \beta_C \cdot \chi)$ – суммарный кинетический параметр, β_D – кинетический параметр, обуславливающий диффузионный перенос вещества через объем пленки к основанию КЦ, β_C – кинетический параметр, обуславливающий скорость потери вещества с поверхности КЦ в камеру, R – радиус области пленки из которой расходуется вещество на образование КЦ, R_m – установившейся радиус КЦ в момент разрыва пленки, χ – безразмерный энергетический множитель.

Используя закон сохранения вещества и исходя из геометрических соотношений в структуре на данной стадии процесса, получено

трансцендентное уравнение связывающее величину краевого угла, при котором пленка с начальной толщиной h_0 разрывается на отдельные фрагменты. Показано, что в случае изменения краевого угла в пределах $\varphi_* < \varphi < \pi/2$, начальный радиус области, из которого расходится вещество пленки на формирование КЦ критического размера можно определить на основании закона сохранения вещества:

$$R_0 \cong (2 \cdot R_m^3 / 3 \cdot h_0)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Параметры толщины и радиуса КЦ, обуславливающие процесс на всех этапах процесс их формирования, имеют наноразмерный масштаб и не проявляют кристаллографических свойств, присущих макроскопическому объему материала [6]. На основании этого можно ожидать, что при разрыве пленки наноразмерной толщины КЦ будут формировать объект в виде шарового сегмента.

При этом, предельный размерный фактор установившегося сегмента будет равным кривизне поверхности КЦ $\omega = 1/R_m$.

Высоту и радиус КЦ можно выразить через величину краевого угла:

$$K = - \frac{d\varphi}{dS} = - \frac{d\varphi}{dy} \cdot \sin\varphi = - \frac{d\varphi}{dx} \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

и учесть, что, при массопереносе в наноразмерных объектах с размерным фактором существенно больше единицы $\omega \gg 1$ анизотропия удельной поверхностной энергии не проявляется, то, характерные размеры индивидуального шарового сегмента (а следовательно и КЦ) можно выразить через его высоту и радиус основания. Последовательно интегрируя равенства (4), высоту установившегося сегмента находим по формуле:

$$h_* = R_m \cdot (1 - \cos\varphi) \quad (5)$$

и радиус основания сегмента по формуле:

$$r_* = R_m \cdot \sin\varphi, \quad (6)$$

где φ — краевой угол между положительным направлением радиуса основания и касательной к образующей профиля каталитического центра.

Расчетные зависимости диаметра и высоты КЦ от краевого угла разработанной физико-математической модели представлены на рисунке 1.

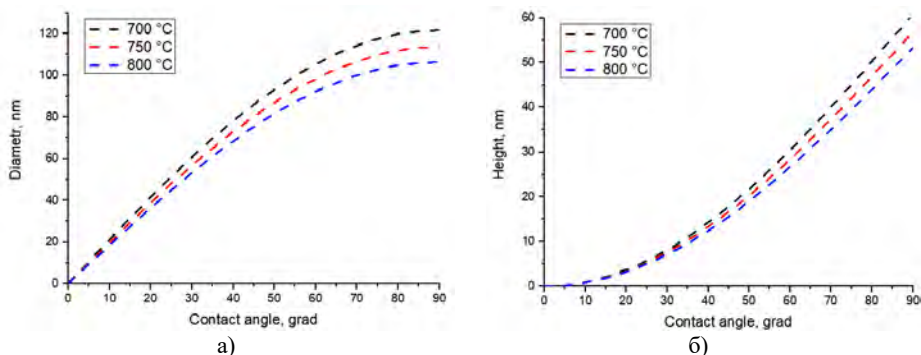


Рис. 1. Расчетные зависимости диаметра (а) и высоты (б) КЦ от краевого угла при различных температурах.

Fig. 1. The calculated dependences of the catalytic centers diameter (a) and height (b) on the contact angle at different temperatures

В результате разработана модуль модель формирования каталитических центров из сплошной пленки Ni, позволяет прогнозировать процесс эволюции пленок Ni и Cr на кремниевой подложке, с учетом образование силицида хрома и процессов сублимации КЦ под действием температуры.

3. Заключение

В результате моделирования установлено, что при повышении температуры на начальной стадии нагрева в многослойной структуре возникает суперпозиция термонапряжений. В начале процесса, доминирующим является термонапряжение в подложке, обусловленное скоростью нарастания температуры после, начинает преобладать термонапряжение, возникающее на границе металл/подложка, зависящее от разницы коэффициентов термического расширения материалов. В плоскости контакта пленка/подложка действуют большие напряжения сжатия, достигающие $2,3 \cdot 10^9$ Н/м².

Показано, что многослойная структура, состоящая из двух или нескольких контактирующих материалов, изначально является термодинамически неустойчивой, где через контактную плоскость между областями будет наблюдаться непрерывный процесс взаимной диффузии, сопровождающийся уменьшением свободной энергии системы. Установлено, что при нагреве структуры Ni/Cr/Si, будет наблюдаться диффузионный поток хрома в решетку кремния, однако при наноразмерной толщине металлического слоя, который существенно меньше диффузионной длины, многослойная структура несимметрична, что будет сказываться как на характере обменной диффузии, так и на компонентном составе структуры. Использование

разработанной модели позволяет предсказать размеры КЦ роста УНТ в зависимости от режимов отжига.

Теория может быть использована при разработке технологических процессов формирования углеродных нанотрубок для приборов вакуумной микроэлектроники, микроэлектронной сенсорики, nano- и микросистемной техники, наноэлектроники.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-29-14023 офи_м и № 18-32-00652 мол_a) и внутреннего гранта Южного Федерального Университета (проект ВНГр-07/2017-26).

Список литературы

- [1] Lim Y.D., Kong Q., Wang S., Tan C.W., Tay B.K., Aditya S. Enhanced field emission properties of carbon nanotube films using densification technique // Appl. Surf. Sci. 2017. No.9. P.1-9.
- [2] Z. Chen, G. Cao, Q. Zhang, P. Lan, B. Zhu, T. Yu, Z. Lin. Large current carbonnanotube emitter growth using nickel as a buffer layer // Nanotechnology. 2007. V. 18. P. 95604.
- [3] Ageev O.A., Blinov Y.F., Il'in O.I., et al. Study of the resistive switching of vertically aligned carbon nanotubes by scanning tunneling microscopy // Phys. Solid State. 2015. V. 57. No. 4. P. 825–831.
- [4] Ageev O.A., Balakirev S.V., Bykov, A.V., et al. Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices //in Parinov, I.A., Shun-Hsyung, C., Topolov, V.Y. (Eds.): “Springer Proceedings in Physics” (Springer International Publishing, 2016). P. 563–580.
- [5] Srivastava A., Liu X.H., Banadaki Y.M. Overview of Carbon Nanotube Interconnects // in “Carbon Nanotubes for Interconnects” (Springer International Publishing, 2017). P. 37–80
- [6] Любов Б.Я. Теория кристаллизации в больших объемах // Наука. 1975.С. 256

References

- [1] Lim Y.D., Kong Q., Wang S., Tan C.W., Tay B.K., Aditya S. Enhanced field emission properties of carbon nanotube films using densification technique // Appl. Surf. Sci. 2017. No.9. P.1-9.
- [2] Z. Chen, G. Cao, Q. Zhang, P. Lan, B. Zhu, T. Yu, Z. Lin. Large current carbonnanotube emitter growth using nickel as a buffer layer // Nanotechnology. 2007. V. 18. P. 95604.
- [3] Ageev O.A., Blinov Y.F., Il'in O.I., et al. Study of the resistive switching of vertically aligned carbon nanotubes by scanning tunneling microscopy // Phys. Solid State. 2015. V. 57. No. 4. P. 825–831.
- [4] Ageev O.A., Balakirev S.V., Bykov, A.V., et al. Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices //in Parinov, I.A., Shun-Hsyung, C., Topolov, V.Y. (Eds.): “Springer Proceedings in Physics” (Springer International Publishing, 2016). P. 563–580.
- [5] Srivastava A., Liu X.H., Banadaki Y.M. Overview of Carbon Nanotube Interconnects // in “Carbon Nanotubes for Interconnects” (Springer International Publishing, 2017). P. 37–80

[6] Ljubov B.Ja. Teorija kristallizacii v bol'shih ob'emah // Nauka. 1975.P. 256

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR according to the research projects. No 16-29-14023 ofi_m and 18-32-00652 mol_a) and Internal grant of Southern Federal University No VnGr-07/2017-26.

Electrical characteristics of indium antimonide nanowires in porous anodic aluminum oxide

¹Bozhev I.V., ²Gorokh G.G., ³Karushkin N.F., ²Lozovenko A.A.,
⁵Novoselov A.S., ⁴Obukhov I.A., ⁵Rumyancev S.V., ^{1,4}Smirnova E.A.

¹*Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov,
Moscow, 119991, Russian Federation
el_smirnova@systemres.ru*

²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
220013, Republic of Belarus*

³*State Research Institute «Orion»
Kiev, 03680, Ukraine*

⁴*Research & Development Organization «Sinergetika»,
Moscow, 115419, Russian Federation*

⁵*Federal Research Center Research Institute for System Studies of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, 117218, Russian Federation*

Abstract: The current-voltage characteristics of samples of nanowires made in matrices of porous anodic aluminum oxide deposited by magnetron sputtering by gold contact groups are measured.

Keywords: indium antimonide, current-voltage characteristics, nanowire matrix, matrix, gold contact.

Электрические характеристики нанопроводов антимонида индия в пористых матрицах анодного оксида алюминия

¹Божьев И.В., ²Горох Г.Г., ³Карушкин Н.Ф., ²Лозовенко А.А.,
⁵Новоселов А.С., ⁴Обухов И.А.,
⁵Румянцев С.В., ^{1,4}Смирнова Е.А.

¹*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация
el_smirnova@systemres.ru*

²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь,*

³*НИИ «Орион», Киев, 030557, Украина*

⁴*НПО «Синергетика», Москва, 115419, Российская Федерация*

⁵*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, 117218, Российская Федерация*

Аннотация: Измерены вольтамперные характеристики образцов нанопроводов, изготовленных в матрицах пористого анодного оксида алюминия с нанесенными методом магнетронного напыления золотыми контактными группами

Ключевые слова: антимонид индия, вольтамперные характеристики, матрица нанопроводов, золотой контакт.

1. Введение

Антимонид индия, являясь узкозонным прямозонным полупроводником группы $A^{III}B^V$, выделяется уникальными свойствами: имеет малую ширину запрещенной зоны E_g (0,2355 эВ при 0 К, 0,180 эВ при 298 К), характеризуется самой высокой среди полупроводников подвижностью электронов (около $78000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), а также имеет самую большую длину свободного пробега электронов (до 0,7 мкм при 300 К) при слабой зависимости основных характеристик от температуры [1].

Наноструктуры из InSb имеют максимальную длину размерного квантования [2]. Они находят широкое применение при изготовлении высокочувствительных фотодиодов, фоторезисторов, датчиков Холла, оптических фильтров. СВЧ элементы из InSb обладают уникальными частотными свойствам (300 ГГц и выше) и способны работать при напряжениях менее 0,5 В [3].

Применение антимонида индия в качестве проводящего канала полевого транзистора на нанопроводе позволяет решить характерную для этого типа приборов проблему низкой крутизны BAX [2]. Транзистор, созданный в 2011 г. в Purdue University (West Lafayette, Indiana, USA) при поддержке DARPA [4] имел вполне приемлемую крутизну характеристики ($g \sim 10^{-5} \text{ А/В}$) и высокую плотность тока ($J \sim 10^4 \text{ А/см}^2$). Аналогичные показатели продемонстрировал и р-канальный полевой транзистор с каналом из нанопровода InSb, легированного углеродом [5].

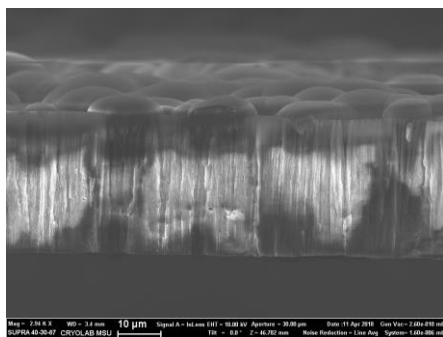
Несмотря на полученные многочисленные положительные экспериментальные результаты, прогнозы о скором широком промышленном применении квантовых приборов на основе нанопроводов из InSb [6] пока не оправдываются. Это связано с отсутствием промышленной технологии создания нанопроводов с заданными геометрическими и электрофизическими характеристиками. Измеренная подвижность в InSb нанопроводах оказалась не столь большой, как ожидалось. В разных экспериментах она изменяется в широких пределах от $120 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ до $25\,000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и существенно зависит от технологии

изготовления нанопровода и свойств подложки, на которую он помещен [7].

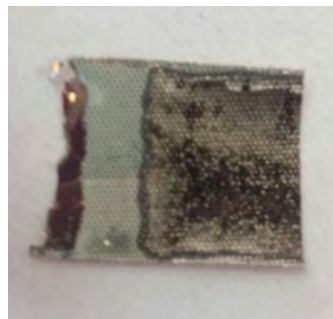
В данной работе приведены результаты измерений электрических характеристик единичных нанопроводов и матриц нанопроводов из антимонида индия в порах анодного оксида алюминия на золотой пленке.

2. Экспериментальные образцы

Объектами исследований являются нанопровода InSb , сформированные в порах анодного оксида алюминия методом электрохимического осаждения из растворов хлоридов. Высота проводов 30 мкм, диаметр 40 нм (Рис. 1а). Золотые контактные группы нанесены методом магнетронного напыления. Нижний контакт имеет соединение со всеми проводами в матрице, верхний – выделяет круглые области диаметром 100 мкм (Рис.1б)



а



б

Рис.1. а – Матрица ОАО с осажденными проводами из антимонида индия, б – схема расположения контактных групп

Fig. 1. a – Matrix AAO with precipitated wires from indium antimonide, b – layout of contact groups

3. Измерения ВАХ одиночного провода в матрице

Прежде всего для оценки допустимого диапазона напряжений были измерены ВАХ одиночных проводов в составе матрицы. При проведении $I(V)$ СЗМ спектроскопии (Current Imaging Tunneling Spectroscopy, CITS) в каждой точке изображения обратная связь разрывается, и напряжение смещения проходит ряд значений V_i (от -1В до +1В и обратно) при этом записываются соответствующие значения тока I_i . Таким образом в зоне, где не был нанесен верхний золотой контакт были исследованы 400

рабочих точек, 20 % которых составляли области с осажденными проводами. Типичная форма ВАХ одиночного провода показана на Рис. 2а. При напряжении 1 В через провод проходит ток порядка 0,098 мкА, площадь сечения единичного провода – $1,26 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$, таким образом плотность тока составляет $7,8 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$. Для сравнения, плотность тока через канал транзистора, полученная в США в 2011 г. составляла порядка 10^4 А/см^2 [4].

Используя расчетную концентрацию носителей в нанопроводе порядка 10^{17} см^{-3} , легко оценить электронную подвижность. Она составляет примерно $10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, то есть в восемь раз ниже, чем в объемном кристаллическом материале. Мы считаем, что это обусловлено поликристаллической структурой нанопроводов антимида индия.



Рис. 2. а – ВАХ одиночного провода с контактом к подложке, б – ВАХ одиночного провода без контакта с подложкой

Fig. 2. а – The CVC of the single-wire with contact to substrate, б – CVC of the single-wire without contact to substrate

На Рис. 2б показана типичная ВАХ нанопровода, у которого контакт с золотой подложкой осуществляется через туннельный зазор. Количество таких проводов приблизительно составляет 30% от общего количества нанопроводов в матрице. Это свидетельствует о недостаточном уровне технологии создания нанопроводов.

4. Измерения характеристик матрицы

Измерения проводились на 10 контактных площадках. На контактную площадку № 1 подавалось напряжение $V_i = -200 \text{ мВ} \dots 200 \text{ мВ}$

(шаг 5мВ). На Рис. 3 представлены все полученные вольтамперные характеристики. Если пересчитать полученные результаты, учитывая, что измерялись ВАХ двух соединенных последовательно площадок, содержащая миллион проводов каждая, то при напряжении 1 В получается ток порядка 0,678 мА. Используя характеристики одиночных нанопроводов, можно заключить, что примерно 69% проводов под контактной площадкой имеют непосредственный контакт с подложкой.

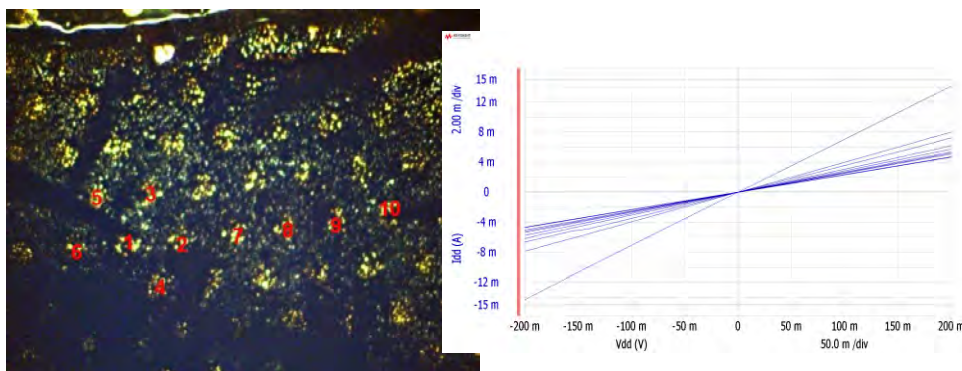


Рис. 3. Контактные площадки 100 мкм в диаметре (слева) и ВАХ матриц (справа)

Fig. 3. Contact pads 100 μm in diameter (left) and the current-voltage characteristics of the matrix (right)

Также проводились измерения емкости матрицы нанопроводов под золотыми контактными площадками диаметром 100 мкм. Они показали значительный разброс значений при разных способах измерения: от единиц нФ/см² до десятков нФ/см². Это свидетельствует о недостаточно отработанной пока методике измерения этого параметра.

5. Заключение

Проведенные измерения позволяют заключить, что структура, представляющая собой параллельно соединенные InSb нанопровода в матрице пористого АОА с золотыми контактами может быть использована для высокочастотных устройств. Грубая оценка предельной частоты по РС дает значения в сотни гигагерц. Относительно высокая емкость структуры открывает перспективу ее применения в антеннах терагерцового диапазона.

Дальнейшее улучшение электрических характеристик матриц нанопроводов возможно за счет доработки технологии равномерного заполнения проводами пор матрицы и использования более толстых верхних золотых контактов.

Список литературы

- [1] Khan M.I., Penchev M., Jing X., Wang X., Ozkan M., Ozkan C.S., Bozhilov K.N.. Electrochemical Growth of InSb Nanowires and Report of a Single Nanowire Field Effect Transistor. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 199–202.
- [2] Obukhov I.A. Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices. LAM-BERT Academic Publishing, 2014. 132 p.
- [3] Chen H., Sun X., Lai K.W.C., Meyyappan M., Xi N. Infrared detection using an InSb nanowire. *IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference*
- [4] Suprem R. Das, Collin J. Delker, Dmitri Zakharov, Yong P. Chen, Timothy D. Sands and David B. Janes Room Temperature Device Performance of Electrodeposited InSb Nanowire Field Effect Transistors, *Appl. Phys. Lett.* 2011. -V. 98, P. 243504-1 - 243504-3.
- [5] Zai-Xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang et al. Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors. *Nanoscale*, 2013. -V. 5 - P. 9671–9676
- [6] Datta S. The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor // *Sematech-2007*. Oregon. USA. October 9th. 2007. <http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key%20Note%20Suman%20Datta.pdf>.
- [7] Önder Gül1, David J. van Woerkom, Ilse van Weperen, Diana Car, Sébastien R Plis-sard, Erik P. A. M. Bakkers and Leo P. Kouwenhoven Towards high mobility InSb nanowire devices, *Nanotechnology*, 2015. - V. 26. - P. 215202-1 - 215202-7.

References

- [1] Khan M.I., Penchev M., Jing X., Wang X., Ozkan M., Ozkan C.S., Bozhilov K.N.. [Electrochemical Growth of InSb Nanowires and Report of a Single Nanowire Field Effect Transistor]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 199–202.
- [2] Obukhov I.A. Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices. LAM-BERT Academic Publishing, 2014. 132 p.
- [3] Chen H., Sun X., Lai K.W.C., Meyyappan M., Xi N. [Infrared detection using an InSb nanowire]. *IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference*
- [4] Suprem R. Das, Collin J. Delker, Dmitri Zakharov, Yong P. Chen, Timothy D. Sands and David B. Janes [Room Temperature Device Performance of Electrodeposited InSb Nanowire Field Effect Transistors], *Appl. Phys. Lett.* 2011. -V. 98, P. 243504-1 - 243504-3.
- [5] Zai-Xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang et al. [Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors]. *Nanoscale*, 2013. -V. 5 - pp. 9671–9676
- [6] Datta S. [The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor]. *Sematech-2007*. Oregon. USA. October 9th. 2007. <http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key%20Note%20Suman%20Datta.pdf>.
- [7]] Önder Gül1, David J. van Woerkom, Ilse van Weperen, Diana Car, Sébastien R Plis-sard, Erik P. A. M. Bakkers and Leo P. Kouwenhoven [Towards high mobility InSb nanowire devices], *Nanotechnology*, 2015. - V. 26. - pp. 215202-1 - 215202-7.

Сенсоры на основе кремниевых наноструктур

¹Крупенин В.А., ¹Божьев И.В., ^{1,2}Трифонов А.С.,
³Преснова Г.В., ³Рубцова М.Ю., ³Уляшова М.М., ¹Дорофеев А.А.,
¹Циняйкин И.И., ^{1,2}Преснов Д.Е.

¹ МГУ имени М.В.Ломоносова, Ленинские горы, дом 1, строение 2, Физический Факультет, г. Москва, 119991, Российская Федерация, krupenin@physics.msu.ru

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, дом 1, строение 2, г. Москва, 119991, Российская Федерация. denis.presnov@physics.msu.ru

³ МГУ имени М.В.Ломоносова, Ленинские горы, дом 1, строение 3, Химический Факультет, г. Москва, 119991, Российская Федерация. gpresnova@gmail.com

Аннотация: В данной работе проведен анализ экспериментального исследования высокочувствительных полевых и зарядовых сенсоров на основе кремниевых нанопроводов. Разработаны оригинальные методы изготовления полевых сенсоров для проведения биоспецифических и локальных исследований. Продемонстрирован локальный полевой зонд с чувствительным элементом в виде полупроводникового нанопровода, расположенного на нанометровом расстоянии от острия зонда, который обладает высоким пространственным разрешением. Исследованы высокочувствительные биосенсоры на основе транзисторов с каналом-нанопроводом, которые имеют высокую чувствительность к pH и белковым комплексам.

Ключевые слова: кремний на изоляторе, полевой транзистор, нанопровод, биосенсор, локальный полевой зонд.

1. Введение

Как известно, полевой транзистор с каналом-нанопроводом является высокочувствительным сенсором электрического поля [1-4]. Возможность детектировать малейшие изменения заряда/электрического поля вблизи канала такого транзистора открывает широкие возможности для практических применений таких сенсоров. Можно выделить два подхода к исследованию наноразмерных объектов с помощью такого транзистора: первый заключается в приближении канала транзистора к объекту исследований, а второй в приближении исследуемого объекта к неподвижному нанопроводу.

В рамках первого подхода разработана, изготовлена и исследована оригинальная высокочувствительная зондовая система [5,6] на основе

полупроводникового нанопровода, располагающегося на нанометровом расстоянии от края кремниевой подложки. Такая конфигурация позволяет максимально приблизить чувствительный элемент - полупроводниковый нанопровод - к исследуемому объекту.

На основе второго подхода разработан высокочувствительный биосенсор [7] на основе полевого транзистора с кремниевым каналом-нанопроводом. Благодаря высокому отношению площади поверхности к объему транзистор демонстрирует высокую чувствительность к заряженным объектам вблизи его поверхности. Биосенсорное устройство на основе полевого транзистора с каналом-нанопроводом может использоваться для ранней диагностики многих заболеваний, что является одним из главных способов профилактики.

2. Зондовая система на основе полупроводникового нанопровода

Основная сложность при изготовлении зондового устройства с активным чувствительным элементом заключается в совмещении нанопровода с оконечностью кристалла. Суть описываемого подхода к решению этой проблемы заключается в использовании единого цикла электронной литографии для одновременного изготовления полупроводниковой структуры полевого транзистора и формирования проводящих электродов. Для этого использовались пластины кремний на изоляторе (КНИ) с неравномерной по глубине концентрацией легирующей примеси в верхнем слое кремния. Поскольку стандартные методы нанесения электронного резиста позволяют получать однородную пленку только на ровной поверхности, слой ПММА наносился на всю пластину целиком, и только после этого пластина разделялась на 4 части с острыми углами.

Для травления верхнего слоя кремния пластины КНИ на его поверхности с помощью электронной литографии и последовательно теневого напыления ($Cr+Al$) формировалась оригинальная биметаллическая маска, состоящая из Cr/Al пленки для изготовления электродов и затвора транзистора и металлической Al пленки – для канала-нанопровода.

Разработанная специализированная программа управления электронным литографом обеспечивала высокоточное совмещение наноструктуры с углом подложки. Верхний алюминиевый слой маски обеспечивал в первом реактивно-ионном травлении формирование предварительной структуры транзистора. Алюминиевая маска удалялась в

слабом растворе КОН. Затем проводилось второе травление, в результате которого с нанопровода стравливался верхний (20-40 нм) слой сильнолегированного кремния. Таким образом формировался слаболегированный кремниевый канал-нанопровод транзистора с омическими контактами к электродам стока и истока. Такой метод совмещения литографируемой структуры с углом подложки позволяет формировать наноструктуры на расстояниях порядка 50 нм и менее от края подложки.

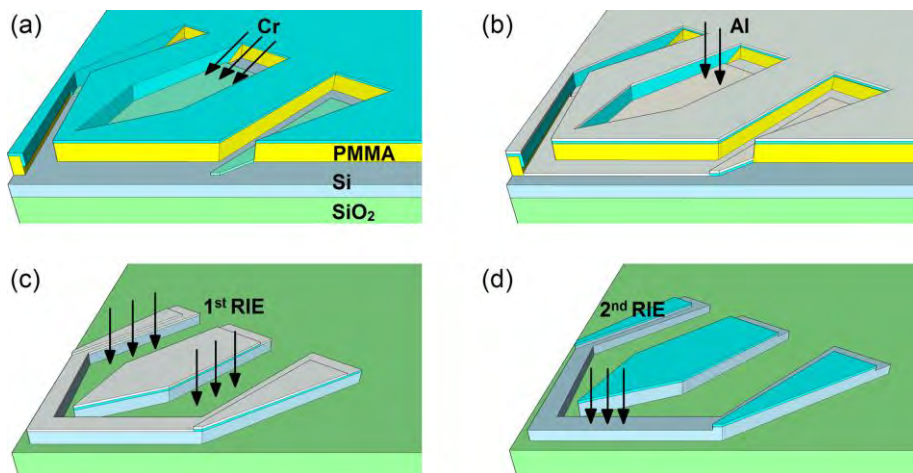


Рис. 1. Схематическое изображение процесса изготовления: (а) - угловое напыление хрома через однослойную маску из ПММА; (б) - напыление алюминиевой маски; (с) - реактивно-ионное травление верхнего слоя кремния через биметаллическую маску; (д) - удаление алюминиевой маски и сильнолегированного слоя кремния с нанопровода

Были измерены шумовые характеристики изготовленных транзисторов. Порог собственной полевой чувствительности транзистора по отношению к его собственному затвору, в качестве которого использовался нижний слой кремния пластины КНИ, составил $0.2 \text{ мВ/Гц}^{1/2}$ на 10 Гц. Шум измерительной электроники был на 4 порядка меньше.

Объединение подобного сенсора с зондовым микроскопом дает возможность создания диагностического устройства для измерения потенциального профиля поверхности с нанометровым пространственным разрешением и высокой чувствительностью при минимальном влиянии на исследуемую поверхность.

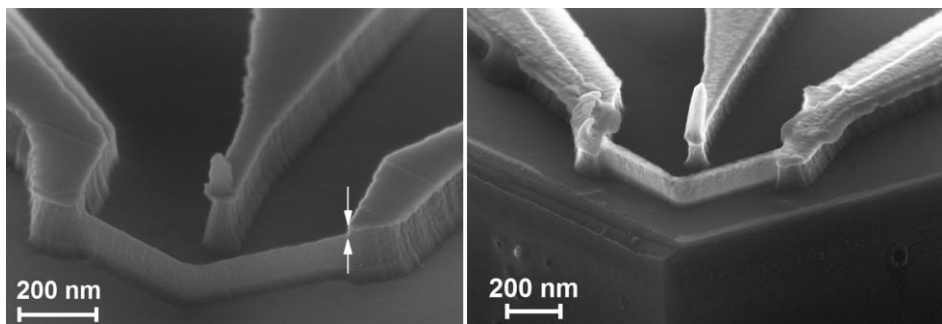


Рис. 2. Микрофотографии готовых транзисторов.

2. Сенсоры для исследования биоспецифических взаимодействий

Разработана методика изготовления биосенсоров на основе транзисторов с каналом-нанопроводом для исследования биоспецифических взаимодействий. Полученные биосенсоры были модифицированы золотыми наночастицами небольшого диаметра (до 5 нм). В работе использовали оригинальный метод иммобилизации фрагментов антител на поверхности золотых наночастиц с использованием собственных тиоловых групп белка.

Метод обеспечивает высокую плотность иммобилизованных антител с благоприятной ориентацией и улучшенным отношением размера поверхности к объему, повышающим электрические характеристики транзистора. Чувствительность сенсора для исследования биоспецифических взаимодействий, составила 70 мВ/рН, что превосходит чувствительность транзисторов с каналом-нанопроводом, модифицированных традиционными методами.

Конструкция нашей экспериментальной установки позволяет модифицировать поверхность нанопровода антителами различной специфичности.

Мы применили разработанные биосенсоры для определения различных биомаркеров рака: простат-специфического антигена (ПСА), тиреоглобулина (ТГ) и тиреотропного гормона (ТТГ) в буфере и искусственных человеческих сыворотках.

Разработанные биосенсоры были успешно применены для мониторинга уровня ПСА в реальных образцах сыворотки. Предел

обнаружения оценивался в ~ 23 фг, и он был на два порядка лучше, чем для стандартных методов твердофазного иммуноферментного анализа (ELISA).

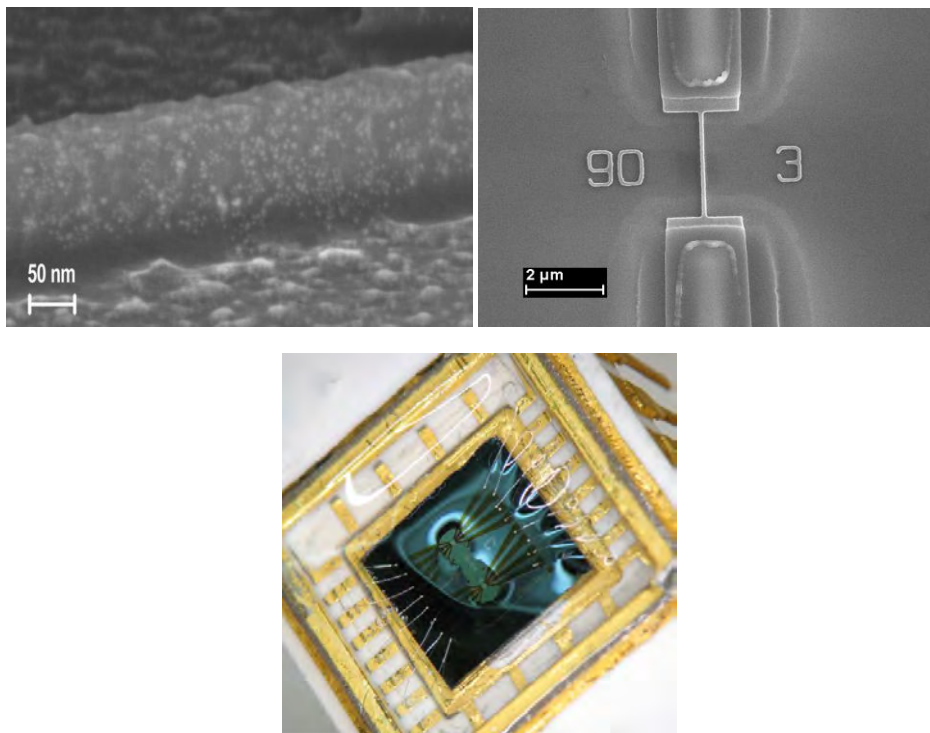


Рис. 3. Структура сенсора для исследования биоспецифических взаимодействий на основе полевого транзистора с каналом-нанопроводом (слева) и поверхность нанопровода после модификации золотыми наночастицами (справа). Подготовленный к измерениям в жидкой среде чип с двумя группами нанопроводов с возможностью различной модификации.

Биосенсоры ТГ и ТТГ могут применяться далее для определения биомаркеров в сыворотках пациентов после тиреоидэктомии с дифференцированным раком щитовидной железы.

Заключение

Представлены методы изготовления и экспериментального исследования высокочувствительных полевых и зарядовых сенсоров на

основе кремниевых нанопроводов, изготовленных из пластин кремния на изоляторе. Разработана оригинальная методика изготовления полевого зонда с чувствительным элементом в виде полупроводникового нанопровода, расположенного на нанометровом расстоянии от оконечности зонда, обладающего высокой чувствительностью и нанометровым пространственным разрешением. Разработаны и продемонстрированы биосенсоры на основе транзисторов с каналом-нанопроводом для исследования биоспецифических взаимодействий.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа подготовлена по итогам исследований полевых транзисторов с каналом-нанопроводом проведенных в рамках проекта Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 16-29-03266.

Список литературы

- [1] A. Zhang and C.M. Lieber, Nano-Bioelectronics. *Chem. Rev.*, **116**, 215-257, 2016. <http://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00608>
- [2] M.A. Mohd Azmi, Z. Tehrani, R.P. Lewis, K.-A.D. Walker, D.R. Jones, D.R. Daniels, S.H. Doak, O.J. Guy, Highly sensitive covalently functionalised integrated silicon nanowire biosensor devices for detection of cancer risk biomarker. *Biosensors and Bioelectronics*, **52**, 216-224 (2014). <http://doi.org/10.1016/j.bios.2013.08.030>
- [3] L. Xu, Z. Jiang, Q. Qing, L. Mai, Q. Zhang, and C.M. Lieber, Design and synthesis of diverse functional kinked nanowire structures for nanoelectronic bioprobes. *Nano letters*, **13**(2), 746-751 (2013). <http://doi.org/10.1021/nl304435z>
- [4] D.E. Presnov, S.V. Amitonov, P.A. Krutitskii, V.V. Kolybasova, I.A. Devyatov, V.A. Krupenin, I.I. Soloviev, A highly ph-sensitive nanowire field-effect transistor based on silicon on insulator. *Beilstein journal of nanotechnology*, **4**, 330-335 (2013). <http://doi.org/10.3762/bjnano.4.38>
- [5] D.E. Presnov, I.V. Bozhev, A.V. Miakonkikh, S.G. Simakin, A.S. Trifonov, and V.A. Krupenin, Local sensor based on nanowire field effect transistor from inhomogeneously doped silicon on insulator. *Journal of Applied Physics*, **123**(5), 054503 (2018). <http://doi.org/10.1063/1.5019250>
- [6] A.S. Trifonov, D.E. Presnov, I.V. Bozhev, D.A. Evplov, V. Desmaris, V.A. Krupenin, Non-contact scanning probe technique for electric field measurements based on nanowire field-effect transistor. *Ultramicroscopy*, **179**, 33-40, (2017). <http://doi.org/10.1016/j.ultramic.2017.03.030>
- [7] G. Presnova, D. Presnov, V. Krupenin, V. Grigorenko, A. Trifonov, I. Andreeva, O. Ignatenko, A. Egorov, M. Rubtsova, Biosensor based on a silicon nanowire field-effect transistor functionalized by gold nanoparticles for the highly sensitive determination of prostate specific antigen. *Biosensors and Bioelectronics*, **88**, 283-289, (2017). <http://doi.org/10.1016/j.bios.2016.08.054>

Nanoelectronic transducer for acoustoelectronic bi-onanosensor

^{1,3}Melnikov A.E., ^{1,3}Soldatov E.S., ²Kolesov V.V., ²Kuznetsova I.E.

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119991, Russian Federation*

²*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, 125009,
Russia*

³*The Center for Quantum Technologies of M.V. Lomonosov Moscow State University
alexen96@gmail.com*

Abstract: *We have developed technology of fabrication of two multiscale structures on the surface of monocrystal piezoelectric lithium niobate substrate. Using photolithography technique we have fabricated a system of interdigital transducers for acoustic delay line with the operating range of 2 – 3 MHz and also combined with nanotransducers on the scale of 60-80 nm fabricated with negative electron-beam lithography.*

Keywords: *nanobiosensors, nanostructures, acoustoelectronic sensors, piezoelectric plates, nanotechnology, electronic lithography.*

Нанoeлектронный трансдьюсер для акустоэлектронного бионаносенсора

^{1,3}Мельников А.Е., ^{1,3}Солдатов Е.С., ²Колесов В.В., ²Кузнецова И.Е.

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
г. Москва, 119991, Российская Федерация*

²*ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва, 125009, Российская Федерация*

³*Центр квантовых технологий МГУ имени М.В. Ломоносова
alexen96@gmail.com*

Аннотация: *В работе разработана технология, реализующая две разномасштабные структуры на монокристаллической пьезоэлектрической подложке ниобата лития. С помощью методов фотолитографии изготовлена система встречно-штыревых электродов для акустической линии задержки, работающей в диапазоне 2 - 3 МГц, совмещенная с нанотрансдьюсерами с характерным размером 60-80 нм, изготовленными с использованием негативной электронно-лучевой нанолитографии.*

Ключевые слова: нанобиосенсоры, наноструктуры, акустоэлектронные датчики, пьезоэлектрические пластины, нанотехнология, электронная литография.

1. Введение

В настоящее время разработка и создание гибридных сенсоров является достаточно актуальной задачей. Как известно, гибридной системой называют систему, содержащую компоненты, выполненные с использованием различных материалов и технологий, соединенных между собой на единой конструктивной основе. В конструкции гибридных сенсоров могут совмещаться различные технологии: электронные, микроволновые, магнитные, акустические, оптические, химические, биологические и др.

Одним из важнейших направлений современных фундаментальных и прикладных исследований в физике твердого тела является формирование и исследование структур, характерные размеры которых составляют единицы или десятки нанометров. Основными функциональными элементами таких объектов (наноструктур), как правило, являются отдельные наночастицы, большие молекулы или атомные кластеры. Сверхмалые размеры наноструктур приводят к пространственному квантованию и необычным физическим свойствам. Изучение этих свойств дает ключ к пониманию фундаментальных пространственных ограничений при разработке электронных и магнитных приборов, с одной стороны, и порождает новые принципы построения электронных устройств, полноценно использующих квантовую природу наноструктур, с другой стороны.

Одной из особенностей некоторых сенсорных устройств является то, что гибридные системы сочетают в себе органические и неорганические элементы. Обычно это различные функциональные элементы (электроды, биосенсоры, каналы), которые выполнены из различных материалов (металлов, кремния, органических элементов).

Использование методов акустоэлектроники и интеграция нанобиосенсоров с акустическими линиями задержки в рамках планарных технологий дают возможность создания акустобионанoeлектронных датчиков с повышенной чувствительностью и селективностью [1].

Совмещение в гибридных сенсорах акустоэлектронных технологий с нанoeлектронными и молекулярными устройствами позволит реализовать новые качества:

-реализовать акустоэлектронный эффект (увлечение электронов акустическими фононами) в низкоразмерных электронных устройствах и разработку сенсоров на их основе;

-обеспечить повышение чувствительности нанoeлектронных сенсоров за счет использования модуляционного режима работы на основе акустического пилот-сигнала и переход от квазистационарного измерения к измерению на частоте модуляции (уменьшение влияния низкочастотных шумов);

-обеспечить «разжижение» двойного электрического слоя (увеличение коэффициентов диффузии отдельных компонентов в приповерхностном слое жидкости) Гельмгольца (ДЭС) при использовании зарядочувствительных нанoeлектронных структур в электрохимических и биохимических сенсорах, например, в одномолекулярных секвенаторах ДНК;

-позволит создать устройства экспресс-анализа биологических жидкостей малого объема, решить вопросы детекции микробных клеток и проводить мониторинг их чувствительности к различным антибиотикам;

-обеспечить эффективную очистку матричной линейки нанoeлектронных сенсоров, работающих в составе комбинированных устройств типа электронный нос и электронный язык.

Следует отметить, что биосенсоры в своем большинстве гораздо более избирательны, чем обычные химические сенсоры [2,3]. Используя современные достижения биотехнологии и нанoeлектроники, можно разрабатывать новые оригинальные нанoeлектронные приборы для биомедицинских технологий дистанционного контроля.

2. Методика изготовления

В данной работе был реализован второй вариант чип-сенсора (Рис.1). Для создания чип-сенсора с планарной наноструктурой нанoeлектронного трансдьюсера использовались технологии магнетронного напыления, стандартной фото- и электронной литографии с использованием различных резистов, а также ионного травления.

Для создания структуры использовалась монокристаллическая пластина ниобата лития толщиной 0.35 мм. Геометрические размеры под-

ложки 2x1.5 см. Для создания системы ВШП структур и подводящих электродов использовался позитивный фоторезист Shepley 1805, который наносился в течение 30 секунд на центрифуге, вращающейся со скоростью 3000 оборотов в минуту. Далее подложка с нанесенным на нее фоторезистом совмещалась с заранее изготовленным фотошаблоном и засвечивалась в ультрафиолете на установке МА750 в течение 15 секунд. Удаление фоторезиста происходило в водном растворе щелочи (гидроксида калия) с концентрацией 0.01 мг/мл в течение 1 минуты. Затем, образец промывался в деионизированной воде и высушивался.

Далее в полученные "окна" из фоторезиста на установке Leybold L-560 методом термического напыления при давлении не ниже, чем 10^{-6} мбар, наносились золотые электроды толщиной 100 нм. Поскольку у золота с ниобатом лития плохая адгезия, сначала наносился подслои хрома толщиной 5-10 нм для ее улучшения. В результате данного технологического процесса получалась готовая система пленочных встречно-штыревых преобразователей на поверхности ниобата лития с системой пленочных проводников для подключения нанoeлектронного трансдьюсера, который формировался в акустически озвученной области 80x80 микрон в центре чипа (рис. 1).

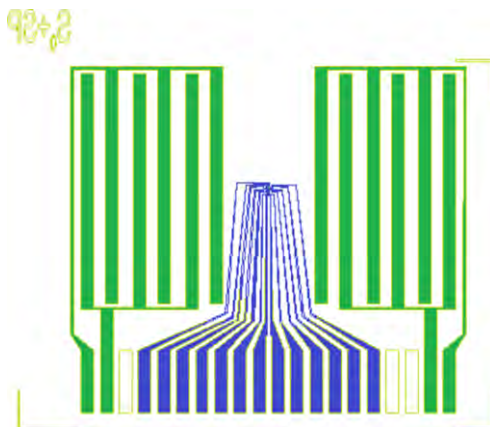


Рис.1 Топология электродов чип сенсора.

Fig.1 Topology of electrodes of a sensor.

Для этого в указанной области создавалась наноструктура, являющаяся преобразом трансдьюсера и представляющая собой систему узких (60 нм)

тонкопленочных нанопроводов. Это выполнялось путем электронно-лучевой нанолитографии с помощью микроскопа Supra 40 с литографической приставкой Raith Elphy Quantum.

Поскольку материал подложки – ниобат лития – является диэлектриком, то отработанная технология позитивной литографии в электронном микроскопе для него неприменима, так как, заряжаясь, подложка будет отклонять электронный луч, что не позволяет получить высокое разрешение нанолитографии, необходимое для получения нанопроводов нужной ширины менее 100 нм. По этой причине была разработана технология негативной нанолитографии, заключающаяся в том, что на подложку с готовыми подводящими проводами и структурой ВШП на установке Z-400 напыляется пленка золота толщиной 15 нм путем магнетронного напыления, затем подложка покрывается негативным резистом МА-N. Полученный слой золота обеспечивает сток электрического заряда, приносимого лучом микроскопа, что позволяет проводить в электронном микроскопе нанолитографию с необходимой разрешающей способностью, в результате которой создается маска структуры нано-транзистора. Затем, после проявления резиста, золотая пленка стравливается с открывшейся поверхности в плазме аргона в установке Z-400 при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ мбар в течение 170 секунд. Это время было выбрано с таким расчетом, чтобы его хватило для удаления со всех неэкспонированных участков подложки пленки золота толщиной только 15 нм, но при этом лежащие под ней ранее сформированные толстые золотые подводящие к наноструктуре провода не были удалены. После этого этапа маска из засвеченного резиста удаляется в кислородной плазме.

В результате, была сформирована пленочная система нанопроводов шириной 60-80 нм (рис. 2, 3), соединенных с контактными площадками на периферии подложки, служащая заготовкой для формирования электродов нанодатчика в транзисторе, конкретный вид и параметры которых определяются типом и свойствами изучаемого биологического объекта.

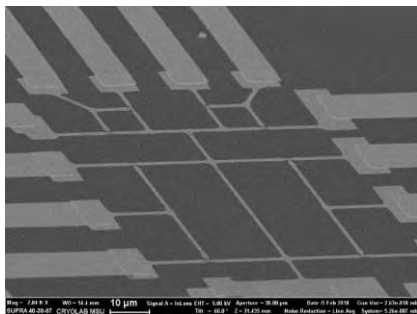


Рис.2 Вид наноструктуры чип-сенсора, полученный с помощью электронного микроскопа.

Fig.2 Images of the structure received from SEM

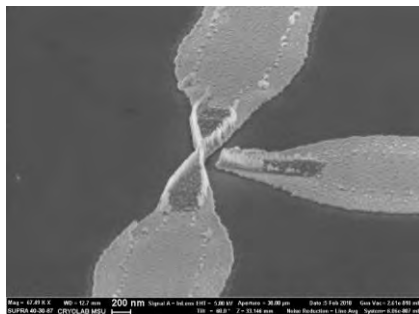


Рис.3 Типичный вид заготовки электродов трансдюсера

Fig.3 Typical view of the electrodes of transducer

3. Заключение

Таким образом, в работе была разработана технология, реализующая две разномасштабные структуры на монокристаллической пьезоэлектрической подложке ниобата лития. С помощью методов фотолитографии изготовлена система встречно-штыревых электродов для акустической линии задержки, работающей в диапазоне 2- 3 МГц, и с использованием негативной электронно-лучевой литографии были изготовлены системы нанопроводов шириной 60-80 нм, служащие основой для формирования нанoeлектродов сенсорных нанодатчиков (трансдюсеров) при изготовлении чувствительных элементов целого семейства акустоэлектронных наносенсоров для использования в биологии, медицине, охране окружающей среды и других областях.

Источники финансирования и выражение признательности

Разработка и создание топологии планарной электродной структуры для гибридного акустонанoeлектронного сенсора выполнена при поддержке проекта РНФ №18-49-08005. Разработка и создание туннельных наноструктур выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-07-00933.

Copyright © 2018 for this paper by its authors. Copying permitted for private and academic purposes.
 Proceedings of the 28th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2018)
 Sevastopol, Russian Federation, September 9—15, 2018

Список литературы

- [1] Polyakov V.V. Advanced nano- and piezoelectric materials and their applications Nova Science Publishers, 2014. P. 19.
- [2] V. Scognamiglio, G. Pezzotti, I. Pezzotti. et al. // Microchimica Acta. 2010. V.170 P.215.
- [3] Reshetilov A.N., Reshetilova T.A. Nanosensors and their applications. Berlin: Springer Verlag GmbH, 2011. P. 269.

References

- [1] Polyakov V.V. Advanced nano- and piezoelectric materials and their applications Nova Science Publishers, 2014. P. 19.
- [2] V. Scognamiglio, G. Pezzotti, I. Pezzotti. et al. // Microchimica Acta. 2010. V.170 P.215.
- [3] Reshetilov A.N., Reshetilova T.A. Nanosensors and their applications. Berlin: Springer Verlag GmbH, 2011. P. 269.

Acknowledgements

Development and elaboration of topology of planar electrodes structure for acoustoelectronic sensor was supported by the Russian Science foundation №18-49-08005. Development and elaboration of tunnel nanostructures was supported by the Russian foundation of Basic Research № 16-07-00933.

Zero-biased detectors based on semiconductor heterostructures

Vostokov N.V., Kraev S.A., Revin M.V., Shashkin V.I.

Institute for Physics of Microstructures RAS

GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

sha@ipmras.ru

Abstract: The original semiconductor heterostructure InGaAs/AlGaAs/GaAs is proposed, optimized and fabricated. The low-barrier diodes made on its basis have a high value of the intrinsic static current responsivity ($> 20 \text{ V}^{-1}$) with a relatively small value of the differential resistance ($10^{-4} \text{ Ohm}\cdot\text{cm}^2$) at zero bias. Estimates of the detection characteristics demonstrate the promise of application diodes as sensitive elements of microwave receivers.

Keywords: semiconductor heterostructure, low-barrier diode, microwave detector.

Низкобарьерные детекторы на основе полупроводниковых гетероструктур

Востоков Н.В., Краев С.А., Ревин М.В., Шашкин В.И.

Институт физики микроструктур РАН

ГСП-105, г. Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация

sha@ipmras.ru

Аннотация: Предложена, оптимизирована и изготовлена оригинальная полупроводниковая гетероструктура InGaAs/AlGaAs/GaAs. Сформированные на ее основе низкобарьерные диоды имеют высокое значение параметра квадратичной нелинейности ($> 20 \text{ В}^{-1}$) при относительно малой величине дифференциального сопротивления ($10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$) при нулевом смещении. Оценки характеристик детектирования демонстрируют перспективность использования разработанных диодов в качестве чувствительных элементов приемников СВЧ излучения.

Ключевые слова: полупроводниковая гетероструктура, низкобарьерный диод, СВЧ детектор.

1. Введение

Исследования, направленные на создание эффективных, компактных и доступных приемников излучения СВЧ и терагерцового диапазонов

продолжаются уже несколько десятков лет [1]. Тем не менее, эта область частот остается недостаточно хорошо освоенной. Наиболее распространенными чувствительными элементами в неохлаждаемых приемниках СВЧ излучения являются диоды с барьером Шоттки (Мотта). Диоды широко используются в смесительных схемах. Несколько реже диоды с барьером Шоттки применяют как квадратичные и видео- детекторы [2]. Для обеспечения высокой чувствительности при детектировании нужно уменьшать эффективную высоту барьера Шоттки до значений, позволяющих не использовать постоянное смещение. Это упрощает конструкцию приемника и приводит к снижению уровня шумов из-за отсутствия постоянного тока смещения. В качестве примера можно привести низкобарьерные диоды на основе контактов Мотта с приповерхностным изотипным д-легированием [3]. В смесительном режиме работы снижение эффективной высоты барьера позволяет уменьшить необходимый уровень мощности гетеродина [4].

В последнее время разрабатываются и используются другие виды нелинейных элементов для детекторов, работающих без постоянного смещения. Примерами являются диоды с объемным барьером [5], гетероструктуры InAs/AlSb/AlGaSb с межзонным туннелированием [6], резонансно-туннельные диоды на основе AlAs/InGaAs/InAs [7], гетероструктуры полуметалл/полупроводник [8], структуры с гетеробарьером InP/InGaAs [9] и др.

Известно, что свойства контактов Шоттки сильно зависят от процесса получения полупроводниковых слоев и условий осаждения металла на полупроводник, что обусловлено их чувствительностью к состоянию границы раздела между металлом и полупроводником, которая может содержать загрязнения и окислы. Для контролируемого управления свойствами барьера Шоттки важно обеспечить воспроизводимые условия формирования границы на атомарном уровне. Это достигается осаждением металла на свежеприготовленную поверхность полупроводника непосредственно в эпитаксиальном реакторе [10], что сильно усложняет технологию. Из-за сильного рассогласования кристаллических решеток большинства металлов и полупроводников, вблизи границы раздела возникает большое количество структурных дефектов и связанных с ними глубоких состояний в запрещенной зоне полупроводника. Высокая плотность интерфейсных состояний, расположенных вблизи уровня Ферми и, как правило, обеспечивающих его пиннинг, может приводить к дополнительному низкочастотному шуму диода [11]. По этим причинам, перспективной представляется идея использования диодной нелинейности гетеробарьера между двумя

монокристаллическими материалами с согласованными или слабо рассогласованными кристаллическими решетками. Использование полупроводниковых и полуметаллических материалов с разным химическим составом и уровнем легирования позволяет в широких пределах управлять высотой барьера гетероперехода. Такому подходу посвящен целый ряд работ. В качестве примера можно привести разработку диода на основе гетероструктуры $\text{EgAs}/\text{InAlGaAs}$ [8]. В этой гетероструктуре монокристаллический слой EgAs является полуметаллом и управление высотой барьера осуществляется варьированием состава слоя $(\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As})_x(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As})_{1-x}$, выращенного на подложке InP . В работе [9] используется полупроводниковая гетероструктура на основе согласованного гетеропары InGaAs/InP . В этом случае управление высотой барьера диода осуществляется с помощью изменения степени легирования вырожденного полупроводникового слоя InGaAs .

Настоящее исследование посвящено созданию оригинальных низкобарьерных диодных гетероструктур $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ на подложке GaAs .

2. Описание диодных гетероструктур

Выращивание гетероструктур осуществлялось в оригинальной установке металлоорганической газовой эпитаксии с горизонтальным кварцевым реактором с индукционным нагревом. В таблице 1 приведена схема слоев одной из исследуемых гетероструктур. Гетеробарьер на границе $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ определяет нелинейные транспортные свойства диода. Небольшой дополнительный гетеробарьер на границе $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ предназначен для уменьшения инжекции электронов в слой AlGaAs , которая может приводить к росту последовательного сопротивления, емкости и ухудшению СВЧ характеристик приемника [12].

Таблица 1. Описание слоев в гетероструктуре.

Table 1. Description of layers in a heterostructure

Номер слоя Layer number	Состав слоя Layer compound	Уровень легирования (Si), см^{-3} Silicon doping level, cm^{-3}	Толщина слоя, $\mu\text{м}$ Layer thickness, μm
0	n^+-GaAs (подложка) n^+-GaAs (substrate)	3×10^{18}	375
1	GaAs	3×10^{18}	0.2
2	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x изменяется в направлении роста от 0.25 до 0.31) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x varies in the direction of growth from 0.25 to 0.31)	нелегированный nominally undoped	0.1
3	$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	8×10^{18}	0.1

3. Результаты измерений и обсуждение

Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на лицевой поверхности образца изготавливались омические контакты круглой формы с удалением слоя InGaAs вокруг контактов. Со стороны подложки омический контакт формировался по всей поверхности. При изготовлении контактов, слои Ge (20 нм), Au (40 нм), Ni (30 нм), Au (100 нм) последовательно наносились на полупроводник методом электронно-лучевого распыления. Отжиг контактов происходил в инертной атмосфере в течение 1 минуты при температуре 440°C.

На рис. 1 показаны зависимости дифференциального сопротивления единицы площади диодной гетероструктуры R и параметра квадратичной нелинейности $\beta = -R'/R$ от напряжения. Зависимости получены численным дифференцированием ВАХ, измеренных на контактах диаметром 10 мкм. При нулевом смещении диод имеет высокое значение параметра нелинейности ($> 20 \text{ В}^{-1}$) при относительно малой величине дифференциального сопротивления ($10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$).

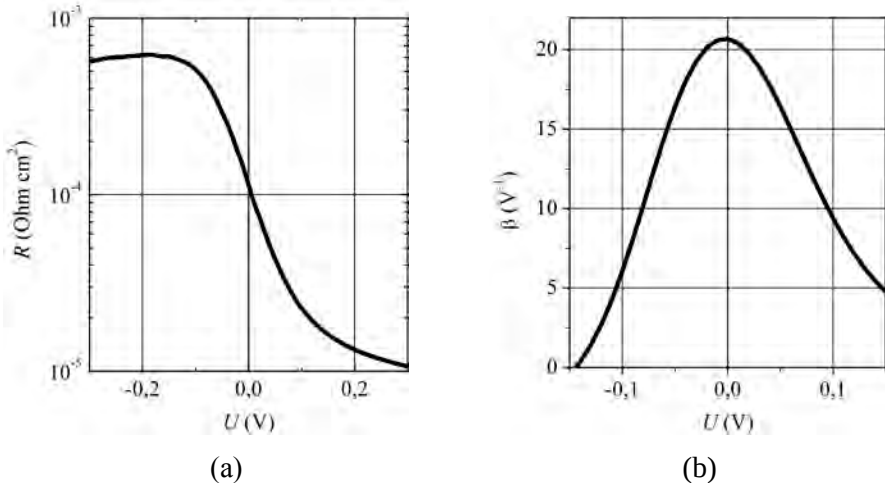


Рис. 1. Зависимости дифференциального сопротивления единицы площади диодной гетероструктуры (а) и параметра квадратичной нелинейности (б) от напряжения.

Fig. 1. Dependences of the differential resistance per unit area of the diode heterostructure (a) and the parameter of the quadratic nonlinearity (b) on the voltage

На рис. 2 показаны расчетные частотные зависимости вольт-ваттной (γ) и пороговой (NEP) чувствительностей диода с площадью 3 мкм^2 , включенного в антенну с импедансом 100 Ом . Для расчета использовался подход, основанный на представлении диода эквивалентной схемой с параллельным соединением дифференциального сопротивления R и ёмкости $C = 1.1 \text{ фФ/мкм}^2$ (геометрическая емкость слоя AlGaAs) и сопротивлением r_s , включённым к ним последовательно [3]. Сопротивление r_s складывается из сопротивления растекания (характерное значение 20 Ом [12]) и сопротивления омического контакта к слою InGaAs R_c . На рисунке приведены зависимости для двух значений R_c равных 10^{-6} и $10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Полученные характеристики детектирования вполне сопоставимы с известными достижениями [9].

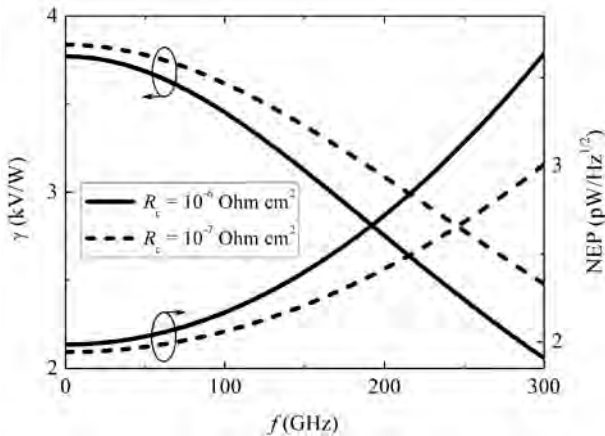


Рис. 2. Зависимости вольт-ваттной (γ) и пороговой чувствительностей (NEP) диодного детектора от частоты.

Fig. 2. Dependences of voltage responsivity (γ) and noise equivalent power (NEP) of the diode detector on frequency

4. Заключение

Разработана и изготовлена оригинальная низкобарьерная диодная гетероструктура $\text{InGaAs/AlGaAs/GaAs}$. На её основе изготовлены тестовые низкобарьерные детекторные диоды, изучены их статические транспортные характеристики. Сделаны оценки, демонстрирующие перспективность использования диодов в качестве чувствительных элементов приемников СВЧ излучения.

Источники финансирования и выражение признательности

Доклад подготовлен по итогам исследований, проведенных в рамках проекта подпрограммы ОФН РАН «Новые источники миллиметрового и терагерцового излучения и их перспективные приложения».

Список литературы

- [1] Sizov F., Rogalski A. THz detectors // *Progress in Quantum Electronics*. 2010. V. 34. No. 5. P. 278-347.
- [2] Brown E.R. A system-level analysis of Schottky diodes for incoherent THz imaging arrays // *Solid-State Electronics*. 2004. V. 48. No. 10-11. P. 2051-2053.
- [3] Shashkin V.I., Drjagin Yu.A., Zakamov V.R., Krivov S.V., Kukin L.M., Murel A.V., Chechenin Y.I. Millimeter-wave Detectors Based on Antenna-coupled Low-barrier Schottky Diodes // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 2007. V. 28. No. 11. P. 945-952.
- [4] Закамов В.Р., Шашкин В.И. Исследования диодов с пониженной высотой барьера в планарном смесителе миллиметрового диапазона длин волн // *Радиотехника и электроника*. 2011, Т. 56. № 8. С. 1009-1013.
- [5] Vo V.T., Hu Z. Optimization and Realization of Planar Isolated GaAs Zero-Biased Planar Doped Barrier Diodes for Microwave/Millimeter-Wave Power Detectors/Sensors // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*. 2006. V. 54. No. 11. P. 3836-3842.
- [6] Su N., Rajavel R., Deelman P., Schulman J.N., Fay P. Sb-Heterostructure Millimeter-Wave Detectors With Reduced Capacitance and Noise Equivalent Power // *IEEE Electron Device Lett*. 2008. V. 29. No. 6. P. 536-539.
- [7] Chahal P., Morris F., Frazier G. Zero Bias Resonant Tunnel Schottky Contact Diode for Wide-Band Direct Detection // *IEEE Electron Device Lett*. 2005. V. 26. No. 12. P. 894-896.
- [8] Young A.C., Zimmerman J.D., Brown E.R., Gossard A.C. Semimetal-semiconductor rectifiers for sensitive room-temperature microwave detectors // *Appl. Phys. Lett*. 2005. V. 87, No. 16. P. 163506(1)-163506(3).
- [9] Ito H., Ishibashi T. InP/InGaAs Fermi-level managed barrier diode for broadband and low-noise terahertz-wave detection // *Jpn. J. Appl. Phys*. 2017. V. 56. No. 1. P. 014101(1)-014101(7).
- [10] Shashkin V., Rushworth S., Daniltsev V., Murel A., Drozdov Yu., Gusev S., Khrykin O., Vostokov N. Microstructure and Properties of Aluminum Contacts Formed on GaAs(100) by Low Pressure Chemical Vapor Deposition with Dimethylethylamine Alane Source // *Journal of Electronic Materials*. 2001. V. 30. No. 8. P. 980-986.
- [11] Young A.C., Zimmerman J.D., Brown E.R., Gossard A.C. Low-frequency noise in epitaxially grown Schottky junctions // *J. Appl. Phys*. 2007. V. 101. No. 8. P. 084509(1)-084509(6).
- [12] Vostokov N.V., Shashkin V.I. Experimental Studies of the Frequency Dependence of the Low-Barrier Mott Diode Impedance // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2017. V. 64. No. 1. P. 109-114.

References

- [1] Sizov F., Rogalski A. THz detectors. *Progress in Quantum Electronics*, 2010, vol. 34, no. 5, pp. 278-347.

- [2] Brown E.R. A system-level analysis of Schottky diodes for incoherent THz imaging arrays. *Solid-State Electronics*, 2004, vol. 48, no. 10-11, pp. 2051-2053.
- [3] Shashkin V.I., Drjagin Yu.A., Zakamov V.R., Krivov S.V., Kukin L.M., Murel A.V., Chechenin Y.I. Millimeter-wave Detectors Based on Antenna-coupled Low-barrier Schottky Diodes. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 2007, vol. 28, no. 11, pp. 945-952.
- [4] Zakamov V.R., Shashkin V.I. Analysis of diodes with a relatively low barrier in the microwave planar mixer. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2011, vol. 56, no. 8, pp. 1013-1016.
- [5] Vo V.T., Hu Z. Optimization and Realization of Planar Isolated GaAs Zero-Biased Planar Doped Barrier Diodes for Microwave/Millimeter-Wave Power Detectors/Sensors. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006, vol. 54, no. 11, pp. 3836-3842.
- [6] Su N., Rajavel R., Deelman P., Schulman J.N., Fay P. Sb-Heterostructure Millimeter-Wave Detectors With Reduced Capacitance and Noise Equivalent Power. *IEEE Electron Device Lett.*, 2008, vol. 29, no. 6, pp. 536-539.
- [7] Chahal P., Morris F., Frazier G. Zero Bias Resonant Tunnel Schottky Contact Diode for Wide-Band Direct Detection. *IEEE Electron Device Lett.*, 2005, vol. 26, no. 12, pp. 894-896.
- [8] Young A.C., Zimmerman J.D., Brown E.R., Gossard A.C. Semimetal-semiconductor rectifiers for sensitive room-temperature microwave detectors. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, vol. 87, no. 16, pp. 163506(1)-163506(3).
- [9] Ito H., Ishibashi T. InP/InGaAs Fermi-level managed barrier diode for broadband and low-noise terahertz-wave detection. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 56, no. 1, pp. 014101(1)-014101(7).
- [10] Shashkin V., Rushworth S., Daniltsev V., Murel A., Drozdov Yu., Gusev S., Khrykin O., Vostokov N. Microstructure and Properties of Aluminum Contacts Formed on GaAs(100) by Low Pressure Chemical Vapor Deposition with Dimethylethylamine Alane Source. *Journal of Electronic Materials*, 2001, vol. 30, no. 8, pp. 980-986.
- [11] Young A.C., Zimmerman J.D., Brown E.R., Gossard A.C. Low-frequency noise in epitaxially grown Schottky junctions. *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 101, no. 8, pp. 084509(1)-084509(6).
- [12] Vostokov N.V., Shashkin V.I. Experimental Studies of the Frequency Dependence of the Low-Barrier Mott Diode Impedance. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2017, vol. 64, no. 1, pp. 109-114.

Acknowledgements

The paper is based on the research results, which was obtained in the project of sub-program of the Branch of Physical Sciences RAS "New sources of millimeter and terahertz radiation and their promising applications".

Нелинейные диэлектрические наноантенны и метаповерхности

Смирнов А.И.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), ул. Ульянова, 46, г. Нижний Новгород,
smirnov.appl@gmail.com

Аннотация: Проанализированы возможности создания эффективных нелинейных диэлектрических «наноантенн», направленным образом рассеивающих падающее излучение на гармониках основной частоты, а также вопросы нелинейной частотной и пространственной фильтрации света на резонансных планарных диэлектрических наноструктурах («метаповерхностях»)..

Ключевые слова: нанофотоника, генерация второй гармоники, нелинейное рассеяние, резонансы Ми, диэлектрические наноантенны.

1. Введение

В последнее десятилетие бурно развивается сравнительно молодое направление науки - «нанофотоника», объединяющее исследования по взаимодействию электромагнитного излучения (преимущественно светового и инфракрасного диапазонов) с частицами, имеющими характерные размеры от одного до сотен нанометров. Интерес к этим исследованиям во многом был инициирован стремлением увеличить скорость обработки информации до терагерцевых частот и выше. Еще одним важнейшим мотивом развития нанофотоники является разработка новых методов диагностики и визуализации объектов с субволновым разрешением. Эти методы очень востребованы в физических и медико-биологических исследованиях, а также для контроля разнообразных нанотехнологических процессов.

В инфракрасном и оптическом диапазонах частот существуют диэлектрические материалы, имеющие большие значения показателя преломления при малых диссипативных потерях. Изготовленные из них наночастицы являются по существу высокодобротными открытыми резонаторами, в которых радиационные потери существенно превышают омические. С этим принципиальным отличием от плазмонных систем связан

наблюдающийся в последнее время оживленный интерес к полностью диэлектрической нанофотонике [1-6]

2. Основные результаты

В докладе обсуждаются особенности нелинейного рассеяния лазерного излучения диэлектрическими наноантеннами и изготовленными из них дискретными планарными решетками.

С использованием аналитических и численных методов нами были проанализированы возможности резонансно усиленной генерации гармоник диэлектрическими наночастицами из материалов с высоким значением показателя преломления и тензорной объемной квадратичной нелинейностью (AlGaAs, BaTiO₃). В частности, развита теоретическая модель генерации второй гармоники лазерного излучения на наночастицах из прозрачного анизотропного диэлектрика в условиях резонансного возбуждения в этих наночастицах высокодобротных мод с преобладающими радиационными потерями [1-3]. Данная модель адекватным образом объясняет наблюдаемые в численном эксперименте особенности нелинейного рассеяния в зависимости от размеров частиц и ориентации поляризации падающей волны по отношению к кристаллическим осям нанообъекта.

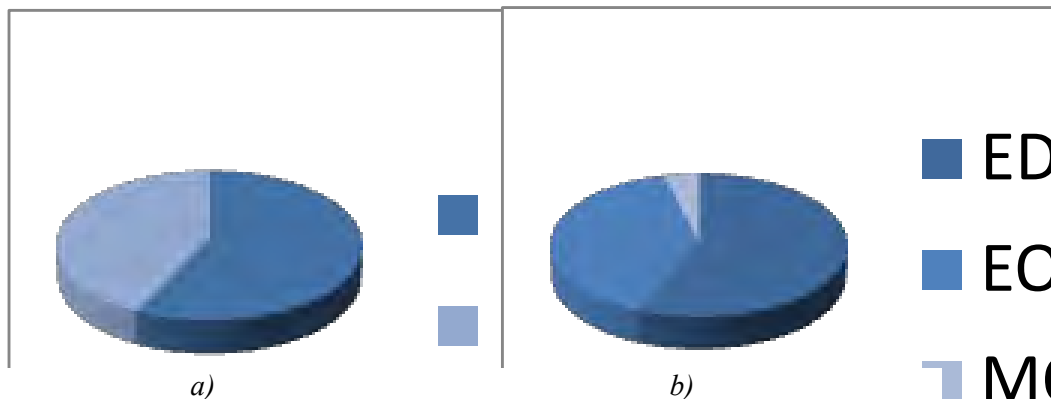


Рис.1. Численный расчет мультипольного состава излучения второй гармоники сферической наночастицы, возбуждаемой плоской волной: а) AlGaAs (частица радиуса 227 nm, длина волны накачки $\lambda = 1550$ nm), б) BaTiO₃ (частица радиуса $a = 214$ nm, длина волны накачки $\lambda = 1050$ nm). Используются следующие обозначения: ED – электрический диполь, MQ – магнитный квадруполь, EO – электрический октоуполь.

С применением пакета COMSOL нами были проведены прямые численные расчеты эффективности генерации второй гармоники и ее мульти-

польного состава для наночастиц с простой геометрической формой и продемонстрирована справедливость развитой теории.

На Рис.1 представлены численного расчета мультипольного состава излучения второй гармоники сферическими наночастицами, изготовленными из AlGaAs и BaTiO₃, в условиях резонансного возбуждения волной накачки достаточно высокодобротной магнитодипольной моды.

Особое внимание в работе уделено исследованию влияния коллективных нелинейных эффектов в дискретных решетках резонансных наночастиц («метаатомов»), поддерживающих высокодобротные магнитодипольные и электродипольные моды, на формирование диаграмм рассеяния на основной частоте и на ее гармониках.

4. Заключение

Таким образом, нами развита теоретическая модель генерации второй гармоники лазерного излучения на наночастицах из прозрачного диэлектрика, характеризуемого известным анизотропным тензором объемной квадратичной нелинейной восприимчивости, в условиях резонансного возбуждения в этих наночастицах высокодобротных мод с преобладающими радиационными потерями. В частности, для сферических наночастиц определен мультипольный состав излучения второй гармоники при возбуждении волной накачки низших (электро и магнитодипольных) резонансов Ми.

Полученные результаты представляют интерес для проектирования высокоэффективных нелинейных наноантенн.

Источники финансирования и выражение признательности

Доклад подготовлен по итогам исследования, проведенного в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-02-00547. Автор благодарен Д.А. Смирновой и И.И. Волковской за помощь в работе.

Список литературы

- [1] D. Smirnova and Y. S. Kivshar, *Optica* **3**, 1241 (2016).
- [2] R. Camacho-Morales et al., *Nano Lett.* **16**, 7191 (2016).
- [3] S. S. Kruk et al., *Nano Lett.* **17**, 3914 (2017).
- [4] F. Timpu, A. Sergeev, N. R. Hendricks, and R. Grange, *ACS Photon.* **4**, 76 (2017).
- [5] C. Ma, J. Yan, Y. Wei, P. Liu, and G. Yang, *J. Mater. Chem. C* **5**, 4810 (2017).
- [6] Daria Smirnova, Alexander I Smirnov, and Yuri S Kivshar, *Phys. Rev. A* **97**, 013807 (2018).

Undamped optical signals propagation in periodical arrays of metal waveguides

^{1,2}Anastasiev A.A., ³Gozman M.I., ^{2,3}Polishchuk I.Ya., ²Polishchuk Y.I.

¹National Research Nuclear University MEPhI
Moscow, 115409, Russian Federation
santafracks@gmail.com

²National Research Centre Kurchatov Institute
Moscow, 123182, Russian Federation
iyp polishchuk@googlegmail.com

³Moscow Institute of Physics and Technology
Dolgoprudnii, 141701, Russian Federation

Abstract: We study the guided modes in the plain periodical arrays of metal waveguides. Multiple scattering formalism is used for the detailed description of the electromagnetic field structure. It is shown numerically that these systems possess a guided mode of a new kind that exists under the condition of nonzero propagation constant only and its properties are insensitive to the material of the waveguide.

Keywords: guided modes, arrays of interacting waveguides, signals transmission, plasmons, nanophotonics.

Перенос незатухающих оптических возбуждений в периодических массивах металлических волноводов

^{1,2}Анастасиев А.А., ³Гозман М.И., ^{2,3}Полищук И.Я., ²Полищук Ю.И.

¹Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"
г. Москва, 115409, Российская Федерация
santafracks@gmail.com

²Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"
г. Москва, 123182, Российская Федерация
iyp polishchuk@googlegmail.com

³Московский физико-технический институт
г. Долгопрудный, 141701, Российская Федерация

Аннотация: Рассматриваются направляемые моды в периодических системах металлических волноводов, изготовленных из серебра, золота и меди. Для опре-

деления структуры электромагнитных полей используется формализм многократного рассеяния. Численно показывается, что такие системы при ненулевых константах распространения обладают модой, поведение которой практически не зависит от материала волновода.

Ключевые слова: направляемые моды, массивы взаимодействующих волноводов, передача сигналов, плазмоны, нанопотоника.

1. Введение

Оптические волноводы являются неотъемлемой частью множества оптоэлектронных устройств. Поскольку основным назначением волноводов является передача сигналов, то взаимодействие между ними, приводящее к разрушению сигнала, является негативным эффектом. Однако в ряде случаев взаимодействие порождает качественно новые эффекты, которые допускают объяснение с позиций физики твёрдого тела. Таковыми являются андерсоновская локализация, оптические блоховские осцилляции, блох-зенеровское тунеллирование и т.д. [1-6]

Настоящая работа посвящена рассмотрению направляемых мод периодических массивов металлических волноводов. Изучен закон дисперсии такой системы при различных значениях константы распространения β для различных материалов, из которых изготовлены волноводы: серебро, медь и золото. Показывается численно, что в случае $\beta \neq 0$ массив волноводов обладает направляемой модой, занимающей часть видимого и инфракрасного диапазона в области $\omega < \beta$, поведение которой практически не зависит от материала волновода.

2. Формализм многократного рассеяния

Для определения структуры электромагнитных полей в системе волноводов используется формализм многократного рассеяния (ФМР). Он основан на точном решении уравнений Максвелла для уединённого цилиндрического волновода бесконечной длины. Этот формализм уже применялся нами ранее в [7] для изучения показателя добротности направляемых мод.

В рамках ФМР поле, создаваемое волноводом, однозначно описывается набором парциальных амплитуд. Пусть R_j – радиус волновода под номером j , а ϵ_j и μ_j – его диэлектрическая и магнитная проницаемости. Тогда поле в волноводе под номером j может быть представлено в виде

$$\mathbf{E}_j = e^{i\beta z - i\omega t} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{im\varphi_j} [a_{jm} \mathbf{M}_{jm} - b_{jm} \mathbf{N}_{jm}], \quad \mathbf{B}_j = e^{i\beta z - i\omega t} n_j \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{im\varphi_j} [a_{jm} \mathbf{N}_{jm} + b_{jm} \mathbf{M}_{jm}] \quad (1)$$

Здесь введены обозначения

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{jm} &= \frac{i\beta J'_m(\kappa_j \rho_j)}{\kappa_j J_m(\kappa_j R_j)} \mathbf{e}_\rho - \frac{\beta m J_m(\kappa_j \rho_j)}{\kappa_j^2 \rho_j J_m(\kappa_j R_j)} \mathbf{e}_\varphi + \frac{J_m(\kappa_j \rho_j)}{J_m(\kappa_j R_j)} \mathbf{e}_z \\ \mathbf{N}_{jm} &= \frac{n_j \omega m J_m(\kappa_j \rho_j)}{c \kappa_j^2 \rho_j J_m(\kappa_j R_j)} \mathbf{e}_\rho + \frac{in_j \omega J'_m(\kappa_j \rho_j)}{c \kappa_j J_m(\kappa_j R_j)} \mathbf{e}_\varphi \\ n_j &= \sqrt{\mu_j \varepsilon_j}, \quad \kappa_j = \sqrt{\frac{n_j^2 \omega^2}{c^2} - \beta^2} \end{aligned} \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) штрих означает производную по аргументу функции, $J_m(x)$ – функция Бесселя, a_{jm} b_{jm} – парциальные амплитуды. Разложение электромагнитного поля вне волноводов имеет похожую структуру. Единственное отличие в том, что функции Бесселя должны быть заменены функциями Ганкеля первого рода, а вместо ε_j и μ_j следует подставить ε_{ex} и μ_{ex} – диэлектрическую и магнитную проницаемости вещества, окружающего волноводы. Также потребуются новый набор парциальных амплитуд c_{jm} d_{jm} , характеризующих поле вне волноводов.

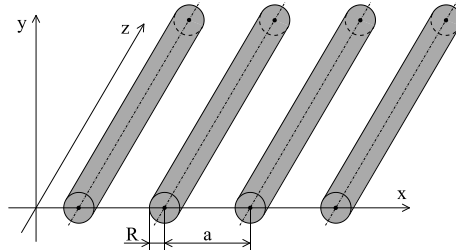


Рис. 1. Массив волноводов.

Fig. 1. Array of waveguides.

Парциальные амплитуды могут быть найдены из граничных условий для уравнений Максвелла на поверхности каждого волновода. В случае периодической системы, изображённой на рис. 1, они образуют блоховскую волну, характеризующуюся квазиволновым вектором $\mathbf{k}$

$$a_{jm} = a_m e^{ikaj}, \quad b_{jm} = b_m e^{ikaj}, \quad c_{jm} = c_m e^{ikaj}, \quad d_{jm} = d_m e^{ikaj}, \quad -\pi \leq \mathbf{k} \mathbf{a} < \pi \quad (3)$$

В рамках ФМР для величин c_m и d_m удастся получить замкнутую систему уравнений, которая в отсутствие внешних полей имеет вид

$$S_m \begin{pmatrix} c_m \\ d_m \end{pmatrix} - \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{J_m(\kappa_{ex} R)}{H_n^{(1)}(\kappa_{ex} R)} U_{m-n} \left(\frac{ka}{\pi}, \frac{\kappa_{ex} a}{\pi} \right) \begin{pmatrix} c_n \\ d_n \end{pmatrix} = 0 \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет нетривиальные решения только в случае

$$\det \left\| S_m \delta_{m,n} - \frac{J_m(\kappa_{ex} R)}{H_n^{(1)}(\kappa_{ex} R)} U_{m-n} \left(\frac{ka}{\pi}, \frac{\kappa_{ex} a}{\pi} \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\| = 0 \quad (5)$$

Решение уравнения (5) неявным образом определяет частоту моды как функцию константы распространения и квазиволнового вектора: $\omega = \omega(\beta, k)$. Эта зависимость носит название закона дисперсии.

3. Моделирование

Для моделирования была выбрана система (рис 1.), аналогичная рассмотренной в [8]. Радиус каждого волновода $R=25\text{нм}$, расстояние между соседними волноводами $a=51\text{нм}$. На рис. 2, 3, 4 представлены дисперсионные кривые для волноводов из серебра, меди и золота соответственно. Диэлектрическая проницаемость этих металлов взята из [9]. Диэлектрическая проницаемость среды вне волноводов считается равной единице.

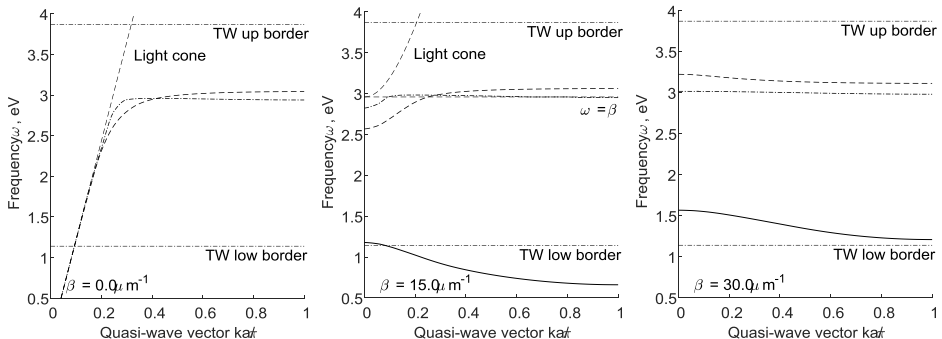


Рис. 2. Законы дисперсии мод для серебряных (Ag) волноводов.

Fig. 2. Dispersion curves for the waveguides made of silver (Ag).

На рис. 2, 3, 4 сплошная кривая отвечает новой моде, существующей только при ненулевых константах распространения, а пунктирная и

штрихпунктирная линии – модам, рассмотренным ранее в [8]. Отметим, что положение новой моды относительно окна прозрачности материала волновода существенным образом определяется величиной константы β .

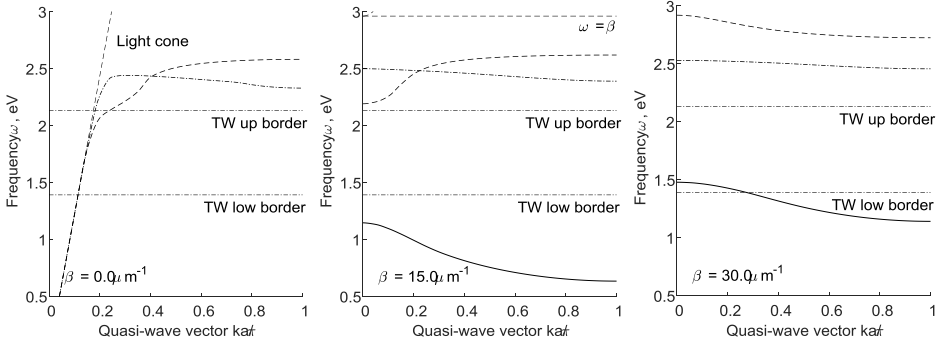


Рис. 3. Законы дисперсии мод для медных (Cu) волноводов.

Fig. 3. Dispersion curves for the waveguides made of copper (Cu).

Границы окна прозрачности материала волновода изображены на рис. 2, 3, 4 горизонтальными штрихпунктирными линиями. Соответствующие данные взяты из [9]. Как следует из расчётов, константа распространения определяет характерную частоту новой моды, в то время как моды, рассмотренные в [8], практически не меняют характерную частоту при изменении β .

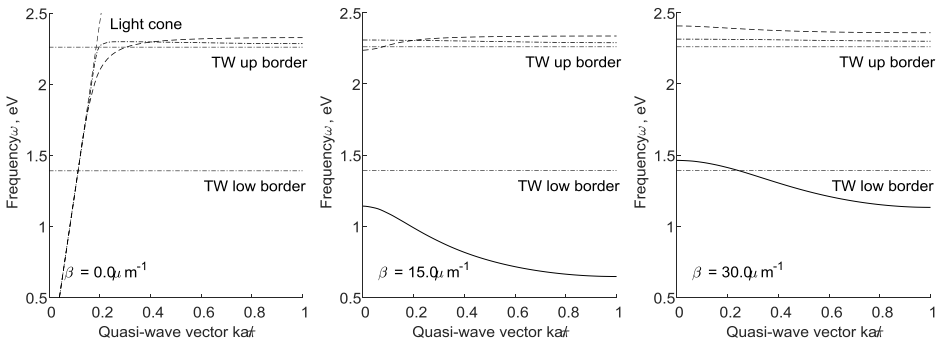


Рис. 4. Законы дисперсии мод для золотых (Au) волноводов.

Fig. 4. Dispersion curves for the waveguides made of gold (Au).

Отметим, что характерные частоты мод, рассмотренных в [8], изменяются при изменении материала волновода, а характерные частоты новой моды практически не зависят от этих изменений. Поскольку серебро, медь

и золото – это металлы, которые наиболее часто встречаются в электронных устройствах, то новая мода оказывается достаточно универсальной

4. Заключение

Рассмотрены периодические системы металлических (Ag, Cu, Au) волноводов. Показано, что в спектрах таких систем имеется дисперсионная кривая, свойства которой существенно зависят от константы распространения и практически не зависят от материала волновода. Одно из таких свойств – увеличение характерной частоты моды с увеличением константы распространения. Это может оказаться полезным при проектировании систем, использующих материалы с узкими окнами прозрачности. Подбором подходящего значения β можно ввести (по крайней мере, частично) новую моду в окно прозрачности конкретного материала и передавать сигнал на желаемой частоте, которую можно перестраивать в широком диапазоне. По мере увеличения константы распространения новая мода становится бездисперсионной.

При любом значении константы распространения β новая мода расположена в области частот $\omega < \beta$, следовательно, она является неизлучающей при любом количестве волноводов в системе. Это делает моду удобной для передачи сигналов в оптических устройствах, поскольку передаваемый сигнал подвержен только омическим потерям, а помехи в других функциональных элементах схемы сводятся к минимуму.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 18-32-00204, 16-02-00660

Список литературы

- [1] Zheng M. J., Xiao J. J., Yu K. W. Controllable optical Bloch oscillation in planar graded optical waveguide arrays // Phys. Rev. A. 2010. V. 81, 033829.
- [2] Lederer F., Stegeman G. I., Christodoulides D. N., Assanto G., Segev M., Silberberg Y. Discrete solitons in optics // Phys. Rep. 2008. V. 463, P. 1-126.
- [3] Christodoulides D. N., Lederer F., Silberberg Y. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices // Nature (London). 2003. V. 424, P. 817-823.
- [4] Szameit A., Pertsch T., Nolte S., Tünnermann A., Lederer F. Long-range interaction in waveguide lattices // Phys. Rev. A. 2008. V. 77, 043804.
- [5] Dreisow F., Szameit A., Heinrich M., Pertsch T., Nolte S., Tünnermann A., Longhi S. Bloch-Zener Oscillations in Binary Superlattices // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102, 076802.
- [6] Гозман М. И., Ю. И. Полищук, И. Я. Полищук, Е. А. Цывкунова. Anomalous optical Bloch oscillations // Solid State Commun. 2015. V. 213-214. P. 16-18.

- [7] Полищук И. Я., Анастасиев А. А., Цыркунова Е. А., Гозман М. И., Соловьёв С. В., Полищук Ю. И. Guided modes in the plane array of optical waveguides // *Phys. Rev. A*. 2017. V. 95, 053847.
- [8] Belan S., Vergeles S. Plasmon mode propagation in array of closely spaced metallic cylinders // *J. Opt. Soc. Am.* 2014. V. 5. P. 130-141.
- [9] Johnson P., Christy R. Optical constants of the noble metals // *Phys. Rev. B*. 1972. V. 6, 4370.

References

- [1] Zheng M. J., Xiao J. J., Yu K. W. Controllable optical Bloch oscillation in planar graded optical waveguide arrays. *Phys. Rev. A*, 2010, vol. 81, 033829
- [2] Lederer F., Stegeman G. I., Christodoulides D. N., Assanto G., Segev M., Silberberg Y. Discrete solitons in optics. *Phys. Rep.*, 2008, vol. 463, pp. 1-126.
- [3] Christodoulides D. N., Lederer F., Silberberg Y. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices. *Nature (London)*, 2003, vol. 424, pp. 817-823.
- [4] Szameit A., Pertsch T., Nolte S., Tünnermann A., Lederer F. Long-range interaction in waveguide lattices. *Phys. Rev. A*, 2008, vol. 77, 043804.
- [5] Dreisow F., Szameit A., Heinrich M., Pertsch T., Nolte S., Tünnermann A., Longhi S. Bloch-Zener Oscillations in Binary Superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, vol. 102, 076802.
- [6] Gozman M. I., Polishchuk Yu. I., Polishchuk I. Ya., Tsyvkunova E. A. Anomalous optical Bloch oscillations. *Solid State Commun.*, 2015, vol. 213-214, pp. 16-18.
- [7] Polishchuk I. Ya., Anastasiev A. A., Tsyvkunova E. A., Gozman M. I., Solov'ov S. V., Polishchuk Yu. I. Guided modes in the plane array of optical waveguides. *Phys. Rev. A*, 2017, vol. 95, 053847.
- [8] Belan S., Vergeles S. Plasmon mode propagation in array of closely spaced metallic cylinders. *J. Opt. Soc. Am.*, 2014, vol. 5, pp. 130-141.
- [9] Johnson P., Christy R. Optical constants of the noble metals. *Phys. Rev. B*, 1972, vol. 6, 4370.

Acknowledgements

The paper is accomplished in the framework of projects of the Russian Foundation for Basic Research No. 18-32-00204 and 16-02-00660.

Advanced nanoantenna

Poletaev D.A., Shadrin A.A., Sokolenko B.V., Nudga A.A.

V.I. Vernadsky Crimean federal university

Simferopol, 295007, Russian Federation

poletaevda@cfuv.ru

Abstract: *In this work an advanced broadband nanoantenna was proposed. Its equivalent circuit and numerical model were constructed. The analysis of proposed advanced nanoantenna's effectiveness was carried out. It is theoretically shown that the proposed construction allows to reduce the reactive resistance of the antenna. As a result, a conclusion was made about the possibility of using proposed advanced nanoantenna in photovoltaic.*

Keywords: *photovoltaic, skin-layer, capacitance, inductance, resonant circuit.*

Усовершенствованная наноантенна

Полетаев Д.А., Шадрин А.А., Соколенко Б.В., Нудьга А.А.

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского

г. Симферополь, 295007, Российская Федерация

poletaevda@cfuv.ru

Аннотация: *В работе рассматривается конструкция усовершенствованной широкополосной наноантенны. Построена ее эквивалентная схема и численная модель. На основании модели проведен анализ эффективности функционирования наноантенны. Теоретически показано, что предложенная конструкция позволяет снизить реактивное сопротивление антенны. Сделан вывод о возможности применения наноантенны предложенной усовершенствованной конструкции в фотовольтаике.*

Ключевые слова: *фотовольтаика, скин-слой, емкость, индуктивность, резонансный контур.*

1. Введение

Наноантенны – широкий класс приборов, которые применяются в различных областях современной науки и техники. С помощью них возможно осуществлять прямое преобразование света в электрическую энергию [1]. Достоинством таких приборов, по сравнению с полупроводниковыми фотоэлектрическими преобразователями, является

простота изготовления, что уменьшает конечную стоимость устройства. Однако, диапазон длин волн, в которых эффективно функционирует наноантенна довольно узок [2].

Для расширения диапазона длин волн, в которых функционирует наноантенна, применяют наборы наноантенн, каждая из которых настроена на определенную длину волны [3]. Недостатком такой системы является невозможность получения высокого КПД, ввиду значительной площади поверхности, занимаемой единичным элементом. Существуют фрактальные наноантенны [2], и наноантенны, выполненные в форме галстука-бабочки [2]. Однако они не способны работать в широком диапазоне длин волн. Целесообразно предложить конструкцию наноантенны, способную эффективно функционировать в широком диапазоне длин волн.

Целью работы является теоретический анализ конструкции предложенной усовершенствованной наноантенны.

2. Исследуемая модель

Рассматриваемая наноантенна состоит из двух соединенных монополярных антенн, образованных квадратными призмами из проводящего материала (рис.1). Высота первой призмы d_1 , второй – d_2 . Стороны квадрата основания призм одинаковы и равны b . Вектор Пойнтинга падающей электромагнитной волны направлен перпендикулярно данной структуре. Каждая квадратная призма данной наноантенны обладает собственной емкостью и индуктивностью. Их величины зависят от геометрических и электрофизических (относительной диэлектрической проницаемостью, проводимостью и относительной магнитной проницаемостью) параметров элементов. Емкость и индуктивность каждой квадратной призмы образуют колебательный контур, имеющий собственную резонансную длину волны. Ввиду наличия скин-слоя у реальных проводников степень связи между данными контурами является нелинейной функцией от длины электромагнитной волны. Эквивалентная электрическая схема данной наноантенны представлена на рис.2.

Уединенная квадратная призма из проводящего материала имеет индуктивность L и емкость C . Эти величины рассчитаны с достаточной точностью, например в [4] и [5], соответственно. Величина сопротивлений R_1 и R_2 , для первой и второй призм, соответственно, нелинейно зависят от длины электромагнитной волны, ввиду наличия скин-эффекта.

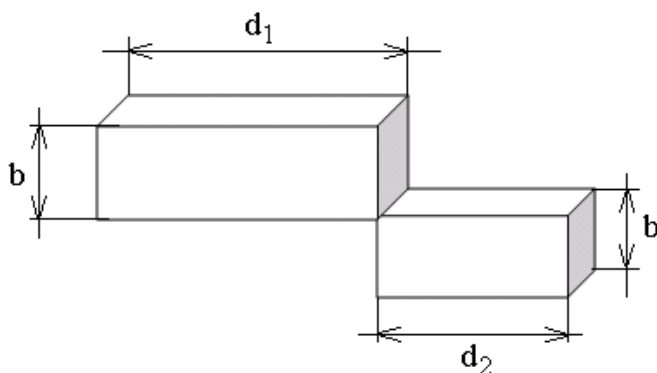


Рис. 1. Структура наноантенны.
Fig. 1. The structure of nanoantennas

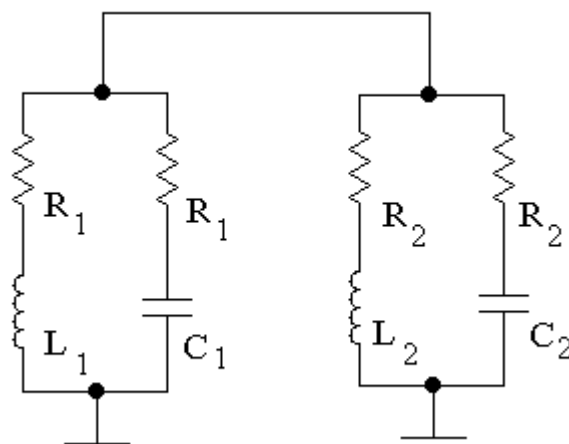


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема наноантенны.
Fig. 2. Equivalent circuit of the nanoantenna

Величины сопротивлений определяются толщинами скин-слоев [6]. Импеданс антенны составляет:

$$Z = \left[\frac{1}{R_1 + j2\pi c L_1 / \lambda} + \frac{1}{R_1 - j\lambda / (2\pi c C_1)} + \frac{1}{R_2 + j2\pi c L_2 / \lambda} + \frac{1}{R_2 - j\lambda / (2\pi c C_2)} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где j – мнимая единица; c – скорость света в вакууме; λ – длина электромагнитной волны.

3. Практические результаты

Подставляя выражения для индуктивности и емкости уединенных проводников, а также выражение для сопротивления в (1), был найден импеданс усовершенствованной наноантенны. Работа антенны считается эффективной, если ее импеданс в области рабочих длин волн чисто активный [7]. График зависимости мнимой части импеданса наноантенны с оптимизированными размерами $d_1=d_2=35$ нм, $b=48$ нм для проводящего материала – медь от длины волны приведен на рис.3. На этом же графике для сравнения приведена зависимость мнимой части отдельной монополярной антенны, образованной квадратной призмой из проводящего материала высотой $d_1=35$ нм со стороной квадрата основания $b=48$ нм.

Как видно из графика на рис.3 в диапазоне длин волн солнечного излучения [1] предложенная конструкция имеет более чем в 2 раза меньшее реактивное сопротивление чем монополярная антенна. При этом площадь, занимаемая предложенной наноантенной по сравнению с монополярной антенной, увеличивается лишь в два раза. Однако, предложенная наноантенна способна эффективно работать в более широком диапазоне длин волн, чем монополярная антенна. Минимум реактивного сопротивления на рисунке 3 приходится на ближнюю ультрафиолетовую область [1]. Это позволяет скомпенсировать поглощение ультрафиолетовой части спектра в атмосфере. Ввиду широкого диапазона длин волн, в котором эффективно функционирует предложенная наноантенна, целесообразно ее применение в фотовольтаике.

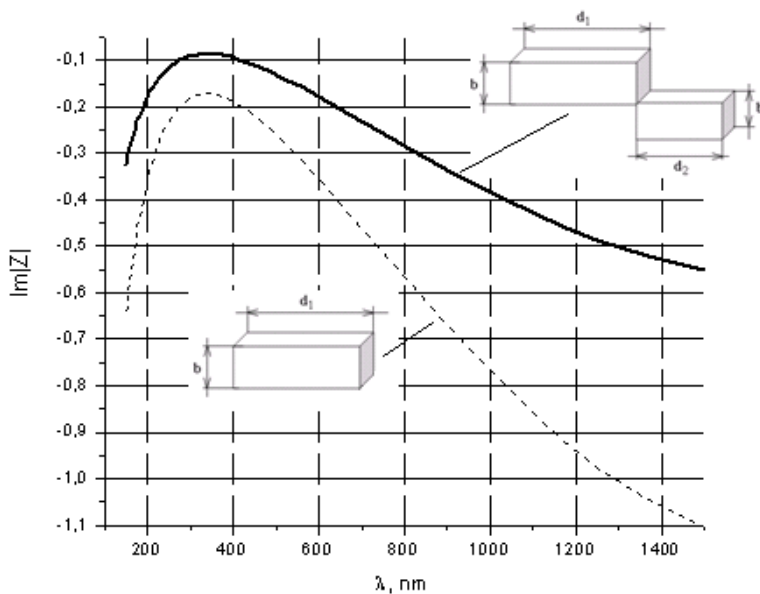


Рис. 3. Зависимость мнимой части импеданса наноантенны от длины волны.
Fig. 3. Dependence of nanoantenna impedance's imaginary part from the wavelength

4. Заключение

В дальнейшем планируется провести численное моделирование параметров антенной решетки из таких элементов. Наиболее применимым для моделирования методом можно считать метод граничных элементов.

Описанная наноантенна может быть изготовлена с помощью метода глубокой ультрафиолетовой литографии с двойным экспонированием. Планируется проведение экспериментальных исследований полученной антенной решетки из таких элементов. На описанную конструкцию наноантенны подана патентная заявка и получен патент Российской Федерации.

Источники финансирования и выражение признательности

Исследование частично профинансировано за счет гранта для молодых ученых программы развития Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского на 2015 – 2024 годы.

Список литературы

- [1] Spinelli P., Ferry V.E., Groep J., Lare M., Verschuuren M.A., Schropp R.E., Atwater H.A., Polman A. Plasmonic light trapping in thin-film Si solar cells // *Journal of Optics*. 2012. V. 14, No. 2. P. 233-255.
- [2] Olmon R.L., Raschke M.B. Antenna-load interactions at optical frequencies: impedance matching to quantum systems // *Nanotechnology*. 2012. No. 23. P. 444-470.
- [3] Curto A.G., Volpe G., Taminiau T.H., Kreuzer M.P., Quidant R., Hulst N.F. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna // *Science*. 2010. No. 329. P. 241-270.
- [4] Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – С.: энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
- [5] Иоссель Ю.А. Расчет электрической емкости / Ю.А. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. – С.: энергоатомиздат, 1981. – 290 с.
- [6] Schelkunoff S.A. *Antennas: theory and practice* / S.A. Schelkunoff, H.T. Friis. – New York: Wiley, 1952. – 639 p.
- [7] Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design* / C.A. Balanis. – New York: John Wiley & Sons, 1996. – 458 p.

References

- [1] Spinelli P., Ferry V.E., Groep J., Lare M., Verschuuren M.A., Schropp R.E., Atwater H.A., Polman A. Plasmonic light trapping in thin-film Si solar cells // *Journal of Optics*. 2012. V. 14, No. 2. P. 233-255.
- [2] Olmon R.L., Raschke M.B. Antenna-load interactions at optical frequencies: impedance matching to quantum systems // *Nanotechnology*. 2012. No. 23. P. 444-470.
- [3] Curto A.G., Volpe G., Taminiau T.H., Kreuzer M.P., Quidant R., Hulst N.F. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna // *Science*. 2010. No. 329. P. 241-270.
- [4] Kalantarov P.L. Calculation of inductances / P.L. Kalantarov, L.A. Tseitlin. – S.: energoatomizdat, 1986. – 488 p. (In Russian).
- [5] Iossel Yu.A. Calculation of electrical capacity / Yu.A. Iossel, E.S. Kochanov, M.G. Strunsky. – S.: energoatomizdat, 1981. – 290 p. (In Russian).
- [6] Schelkunoff S.A. *Antennas: theory and practice* / S.A. Schelkunoff, H.T. Friis. – New York: Wiley, 1952. – 639 p.
- [7] Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design* / C.A. Balanis. – New York: John Wiley & Sons, 1996. – 458 p.

Acknowledgements

This work was partially supported by the V.I. Vernadsky Crimean federal university development program for 2015 – 2024 within the framework of grant support for young scientists.