

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

9-я Международная научно-практическая конференция
по физике и технологии
наногетероструктурной СВЧ-электроники

23 мая 2018 года

СБОРНИК ТРУДОВ

МОСКВА

УДК 621.382(06)+539.2(06)+620.3(06)
ББК 22.36в6
М 74

Мокеровские чтения. 9-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 23 мая 2018 г.: сборник трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – 164 с.

Тематика конференции объединила работы ведущих российских исследователей по целому ряду научно-технических и технологических задач в области гетероструктурной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Материалы докладов подготовлены сотрудниками различных учреждений: институтов Российской академии наук, представителями производственных организаций, вузов и отражают современное состояние и пути развития проблем СВЧ твердотельной электроники на основе наноразмерных гетероструктур и других новых функциональных материалов. Тезисы докладов размещены в тематических секциях, в соответствии с программой конференции. Это разделы: фундаментальные аспекты наногетероструктурной сверхвысокочастотной электроники; полупроводниковые СВЧ приборы и устройства: производство, технологии и свойства; гетероструктуры и сверхрешетки, двумерные, одномерные и нульмерные структуры; функциональная электроника и оптоэлектроника.

Материалы получены до 1 апреля 2018 г.

Сборник трудов издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2471-8

© *Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2018*

National Research Nuclear University «MEPhI»

Open Readings named after RAS
Corresponding Member,
Professor V.G. Mokerov

IX International Conference
on Physics and Technology
of Nanoheterostructure Microwave Electronics

May 23, 2018

Conference Proceedings

MOSCOW

The IX International Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructure Microwave Electronics (In honour of RAS Corresponding Member, Professor V.G.Mokerov)

The Conference unites leading scientists and technologists working on the wide range of problems in the field of heterostructure microwave electronics and related topics. The Conference speakers represent various organizations: the Institutes of the Russian Academy of Sciences, the Industrial institutions, the Universities. The presentations reflect the modern state and development of microwave electronics based on nanoheterostructures and other advanced functional materials. Abstracts are combined into thematic sections corresponding to the conference program. The sections are: Fundamentals of nanoheterostructure microwave electronics; Semiconductor microwave devices: fabrication, technology and performance Advanced materials, Heterostructures and superlattices, two-dimensional, one-dimensional and zero-dimensional structures; Functional electronics and Optoelectronics, Terahertz photonics.

Proceedings were received before 20.03.2018.

Proceedings are published as received with no editing.

ISBN 978-5-7262-2471-8

© National Research Nuclear University «MEPhI», 2018

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРНОЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

ГУДИНА С.В., АРАПОВ Ю.Г., ИЛЬЧЕНКО Е.В., НЕВЕРОВ В.Н., САВЕЛЬЕВ А.П., ПОДГОРНЫХ С.М., ШЕЛУШИНИНА Н.Г., ЯКУНИН М.В., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н. Роль спин-орбитального взаимодействия в режиме квантового эффекта холла в системах InGaAs/InAlAs с высоким содержанием InAs	12
ВАСИЛЬЧЕНКО А.А., КОПЫТОВ Г.Ф. Квазидвумерная электронно-дырочная жидкость в магнитном поле	14
ПАШКОВСКИЙ А.Б., НОВИКОВ С.И., МАРТЫНОВ Я.Б., ЛУКАШИН В.М. Оценка всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-pHEMT	16
ПРОТАСОВ Д.Ю., БАКАРОВ А.К., ТОРОПОВ А.И., ЖУРАВЛЕВ К.С. Энергетическая релаксация горячего ДЭГ при взаимодействии с акустическими фононами в гетероструктурах DA-PHEMT с двумя заполненными подзонами размерного квантования.....	18
БАРЫШНИКОВ Н.Б., СИБИРМОВСКИЙ Ю.Д., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н., КАРГИН Н.И. Исследование электронного транспорта в pHEMT гетероструктурах InGaAs/AlGaAs с различным уровнем легирования методом фото-Холла	20
САФОНОВ Д.А., ВИНИЧЕНКО А.Н., КАРГИН Н.И., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С. Квантовый магнетотранспорт в односторонне δ -легированных PHEMT гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs с высокой электронной плотностью	22
НИКЕРОВ Д.В., НИКИТЕНКО В.Р., КОРОЛЁВ Н.А. Особенности дрейфа и диффузии носителей заряда в тонких слоях для приборов органической электроники.....	24
БОГДАНОВ Е.В., МИНИНА Н.Я. Влияние одноосного сжатия на концентрацию и подвижность электронов в гетероструктуре n-GaAs/AlGaAs:Si	26
АЛТУХОВ И.В., КАГАН М.С., ПАПРОЦКИЙ С.К., РОДИОНОВ Н.Б., БОЛЬШАКОВ А.П., РАЛЬЧЕНКО В.Г., ХМЕЛЬНИЦКИЙ Р.А. Проводимость монокристаллического алмаза, легированного бором, в сильных электрических полях	28
АВЕРЬЯНОВ Д.В., СОКОЛОВ И.С., КАРАТЕЕВ И.А., ТАЛДЕНКОВ А.Н., ТОКМАЧЁВ А.М., ПАРФЁНОВ О.Е., КОНДРАТЬЕВ О.А., СТОРЧАК В.Г. Магнитные и транспортные свойства сверхтонких силициновых структур на кремнии	30
БОРИСЕНКО Д.П., ГУСЕВ А.С., КОМИССАРОВ И.В., КАРГИН Н.И., ГРЕХОВ М.М., ЛАБУНОВ В.А., СТРИХАНОВ М.Н., КОВАЛЬЧУК Н.Г. Молекулярно-лучевая эпитаксия нитрида галлия на графене	32

ДАШКИН Р.А., ЧЕРНЯКОВ П.О., ЗЕБРЕВ Г.И.

Моделирование разброса пороговых напряжений, обусловленного накоплением стохастического заряда в окислах наноразмерных МОП транзисторов.....	34
--	----

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА:
ПРОИЗВОДСТВО, ТЕХНОЛОГИИ И СВОЙСТВА

ЖУКОВ А.Е., КРЫЖАНОВСКАЯ Н.В., МАКСИМОВ М.В., МОИСЕЕВ Э.И.,
ЗУБОВ Ф.И., КУЛАГИНА М.М., ТРОШКОВ С.И., ЗАДИРАНОВ Ю.М.

Перспективы интеграции лазерных излучателей и кремния с помощью микрорезонаторов с квантовыми точками	36
ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н., РЫЖУК Р.В., ГРЕХОВ М.М., НОМОЕВ С.А., АНТОНОВА Н.В., АВРАМЧУК А.В., ЗАХАРЧЕНКО Р.В., ШОСТАЧЕНКО С.А., СТРИХАНОВ М.Н., КАРГИН Н.И.	

Разработка интегрального модулятора Маха-Цандера на платформе InP.....	38
ЖУРАВЛЕВ К.С., ДМИТРИЕВ Д.В., ТОРОПОВ А.И., АКСЕНОВ М.С., ВАЛИШЕВА Н.А., ГИЛИНСКИЙ А.М., ЧИСТОХИН И.Б., МАЛЬШЕВ С.А., ЧИЖ А.Л., МИКИТЧУК К.Б.	

СВЧ фотодиод на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs/InP	40
ВОРОПАЕВ К.О., СЕЛЕЗНЕВ Б.И., ИОНОВ А.С., ПЕТРОВ А.В.	

Вертикально-излучающие лазеры, сформированные методом спекания	42
ФЕДОРОВ Д.Г., СЕЛЕЗНЕВ Б.И.	

Приборные структуры на основе GaN с ионно-легированными слоями	44
ЖЕЛАННОВ А.В., СЕЛЕЗНЕВ Б.И.	

Применение проводящего сар-слоя GaN при формировании транзисторных структур на нитриде галлия	46
ПАВЛОВ В.Ю., ПАВЛОВ А.Ю., СЛАПОВСКИЙ Д.Н.	

Влияние тепловых процессов на свойства несплавных омических контактов к нитридным гетероструктурам	48
СЛАПОВСКИЙ Д.Н., ПАВЛОВ А.Ю., ПАВЛОВ В.Ю., КЛЕКОВКИН А.В., ТОМОШ К.Н.	

Использование сплавных омических контактов на основе Si/Al при изготовлении полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/GaN	50
ЕНИШЕРЛОВА К.Л., КОЛКОВСКИЙ Ю.В., БОБРОВА Е.А., ТЕМПЕР Э.М., КАПИЛИН С.А.	

С-V-характеристики и глубокие уровни в AlGaIn/GaN НЕМТ-транзисторах ...	52
ПАВЛОВ А.Ю., ПАВЛОВ В.Ю., ТОМОШ К.Н., КЛЕКОВКИН А.В., ФЕДОРОВ Ю.В.	

Использование низкоэнергетичного процесса травления AlGaIn при формировании подзатворного заглибленного полевого транзистора на AlGaIn/GaN гетероструктуре	54
--	----

РЫЖУК Р.В., АВРАМЧУК А.В., СТРИХАНОВ М.Н., КАРГИН Н.И., ЗАХАРЧЕНКО Р.В., ТИМОФЕЕВ А.А., ПОРОХОНЬКО Ю.А., ШОСТАЧЕНКО С.А. Плазмохимическое травление гетероэпитаксиальных структур InAlAs/InGaAs/InP	56
СУЛТАНОВ А.О., ГУСЕВ А.С., СТРИХАНОВ М.Н., КАРГИН Н.И., РЫНДЯ С.М., САФАРАЛИЕВ Г.К., СИГЛОВАЯ Н.В., ТИМОФЕЕВ А.А. Исследование процессов карбидизации пористого кремния.....	58
ИВАНОВА Н.Е., ГНАТЮК Д.Л., ЦАВРУК Н.В. Метод формирования заземляющей плоскости в МИС на основе нитрида галлия	60
ГЕРГЕЛЬ В.А., ГОРШКОВА Н.М., СОБОЛЕВ А.С., ТАРАСОВ М.А., МИНКИН В.С., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ПАВЛОВ А.Ю. Технологический маршрут изготовления мультибарьерных гетероструктур для генерации и регистрации СВЧ излучения	62
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И СВЕРХРЕШЕТКИ, ДВУМЕРНЫЕ, ОДНОМЕРНЫЕ И НУЛЬМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ	
ГЕРГЕЛЬ В.А., ГОРШКОВА Н.М., СОБОЛЕВ А.С., ТАРАСОВ М.А., МИНКИН В.С. Изучение особенностей терморелаксационных процессов в мультибарьерных гетероструктурах	64
АНДРОНОВ А.А., ИКОННИКОВ А.В., МАРЕМЬЯНИН К.В., НОЗДРИН Ю.Н., ПОЗДНЯКОВА В.И., МАРМАЛЮК А.А., ПАДАЛИЦА А.А., ЛАДУГИН М.А., БЕЛЯКОВ В.А., ЛАДЕНКОВ И.В., ФЕФЕЛОВ А.Г. Транспорт и ТГц стимулированные излучения в простых сверхрешетках в области положительной статической дифференциальной проводимости.....	66
АЛТУХОВ И.В., КАГАН М.С., ПАПРОЦКИЙ С.К., ХВАЛЬКОВСКИЙ Н.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н. Туннельная проводимость короткопериодных сверхрешеток GaAs/AlAs с электрическими доменами при комнатной температуре.....	68
СИБИРМОВСКИЙ Ю.Д., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н., САФОНОВ Д.А., СТРИХАНОВ М.Н., КАРГИН Н.И. Замороженная фотопроводимость и эффект Ааронова-Бома в структурах «квантовые кольца на квантовой яме» GaAs/AlGaAs.....	70
БУРБАЕВ Т.М. , САДОФЬЕВ Ю.Г. , АКМАЕВ М.А., АЛЕШКИНИ В.А., АЛЕЩЕНКО Ю.А., КЛЕКОВКИН А.В., МУРАТОВ А.В., НОВИКОВ А.В., УШАКОВ В.В., ЮНИН П.А., ЮРАСОВ Д.В. Выращенные на кремнии многослойные гетероструктуры Ge/SiGe для оптоэлектроники.....	72
КЛЕКОВКИН А.В., КАЗАКОВ И.П., ЦВЕТКОВ В.А., АКМАЕВ М.А., ЗИНОВЬЕВ С.А. Выращивание квантовых ям Si/Si _x Ge _x /Si (x < 0.) на основе короткопериодных сверхрешеток.....	74

КАЗАКОВА А.Е., ЛУНИН Л.С., ЛУНИНА М.Л., АРУСТАМЯН Д.А. Исследование люминесцентных свойств гетероструктур AlGaInAsP/InP.....	76
КУЛЫГИН Д.А. Механизм роста квантовых точек методом МЛЭ.....	78
СЛУЧИНСКАЯ И.А., ЛЕБЕДЕВ А.И., САИДЖОНОВ Б.М., ВАСИЛЬЕВ Р.Б. Локальная структура коллоидных наногетероструктур CdSe/ZnS	80
ВАСИЛЬЕВ Р.Б., КАРЛОВА Д.А., ГАРШЕВ А.В., ГАСЬКОВ А.М. Спонтанное сворачивание атомно-тонких нанолистов CdTe и CdSe: синтез, структура и оптические свойства.....	82
ВАСИЛЬЕВ Р.Б., ДРОЗДОВ К.А., КОЗЛОВСКИЙ В.Ф., ЛЕБЕДЕВ А.И., САИДЖОНОВ Б.М., ХОМИЧ А.А. Исследование наногетероструктур CdSe/CdS методами ИК- и рамановской спектроскопии.....	84
СТЕПИХОВА М.В., ЯБЛОНСКИЙ А.Н., СЕРГЕЕВ С.М., СКОРОХОДОВ Е.В., ШАЛЕЕВ М.В., НОВИКОВ А.В., КРАСИЛЬНИК З.Ф. Фотонно-кристаллические резонаторы, сформированные на базе светоизлучающих кремниевых структур с самоформирующимися наноостровками Ge(Si). Процессы резонансного и нерезонансного усиления сигнала фотолюминесценции	86

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСИСТЕМ И ГЕТЕРОСТРУКТУР

ХОРОШКО Л.С., РУДЕНКО М.В., ГАПОНЕНКО Н.В., ШЕЙДАКОВА К.В., СУКАЛИН К.С., РАЙЧЁНОК Т.Ф., МУДРЫЙ А.В. Легированные лантаноидами наноструктурированные порошки алюмоиттриевого граната, синтезированные золь-гель методом	88
СТРОГОВА А.С., КОВАЛЕВСКИЙ А.А., ГРАНЬКО С.В., ВОРОНЕЦ Я.С. Элементный состав на границе раздела нанопленки диспрозия-нанокластеры Si, Ge и SiGe.....	90
РУСАК Т.Ф., ЕНИШЕРЛОВА К.Л., ЛЮТЦАУ А.В., САРАЙКИН В.В., КОРНЕЕВ В.И. Особенности дислокационной структуры эпитаксиальных слоев AlGaIn/GaN при легировании слоя GaN углеродом и железом.....	92
ЛЮТЦАУ А.В., ТЕМПЕР Э.М., ЕНИШЕРЛОВА К.Л., КОЛКОВСКИЙ Ю.В. Способ оценки напряжённого состояния гетероструктур AlGaIn/GaN пошаговым наклоном плоскости дифракции на однокристалльном дифрактометре XMD-00	94
ГАЛИЕВ Г.Б., КЛИМОВ Е.А., ПУШКАРЁВ С.С., КЛОЧКОВ А.Н., КОПЫЛОВ В.Б. Исследование фотолюминесценции дефектов различного типа в гетероструктурах с метаморфным буфером InAlAs	96

АВРАМЧУК А.В., МИХАЛИК М.М., ГРЕХОВ М.М., БОРИСЮК П.В., ЛЕБЕДИНСКИЙ Ю.Ю., СТРИХАНОВ М.Н., КАРГИН Н.И., ЛАБУНОВ В.А., КОМИССАРОВ И.В.	
Влияние оксида алюминия, осажденного методом атомно-слоевого осаждения, на структуру и электронные свойства эпитаксиального графена.....	98
АВРАМЧУК А.В., МИХАЛИК М.М., НИГЕРИШ К.А., ФОМИНСКИЙ В.Ю., РОМАНОВ Р.И., СУЛТАНОВ А.О., ГУСЕВ А.С., ЛАБУНОВ В.А., КОМИССАРОВ И.В., СТРИХАНОВ М.Н., КАРГИН Н.И.	
Исследование процессов графитизации поверхности пленок 3C-SiC/Si при импульсном лазерном отжиге.....	100
МИХАЛИК М.М., КОВАЛЬЧУК Н.Г., НИГЕРИШ К.А., КАРГИН Н.И., КОМИССАРОВ И.В., ПРИЩЕПА С.Л.	
Мониторинг степени легирования графена методом рамановской спектроскопии.....	102
НИГЕРИШ К.А., КОВАЛЬЧУК Н.Г., МИХАЛИК М.М., КОРОЛИК О.В., ТИВАНОВ М.С., ЕЛИСЕЕВ А.А., КАРГИН Н.И., КОМИССАРОВ И.В.	
Зависимость положений линий спектров КРС подвешенного графена от температуры и от мощности возбуждающего лазера.....	104
БУРДЫКИН М.С., ЗАХАРЧЕНКО Р.В., ШОСТАЧЕНКО С.А., ПОРОХОНЬКО Ю.А.	
Исследование оптических и электрофизических свойств прозрачных проводящих пленок на основе оксида индия-олова.....	106
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.....	108

ТЕРАГЕРЦОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА

ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЦАВРУК Н.В., ПОНОМАРЕВ Д.С., УШАКОВ Д.В., АФОНЕНКО А.А., ВОЛКОВ О.Ю., ПАВЛОВСКИЙ В.В.	
Температурная зависимость выходной мощности терагерцовых квантово-каскадных лазеров на основе резонансно-фононного дизайна.....	110
ЦАВРУК Н.В., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЗАЙЦЕВ А.А., БАБКИН В.Г.	
Изготовление терагерцового квантово-каскадного лазера с двойным металлическим волноводом на основе серебра.....	112
АЛЕКСАНЯН А.А., КАРУЗСКИЙ А.Л., МИТЯГИН Ю.А., МУРЗИН В.Н., ПЕРЕСТОРНИН А.В., ЦХОВРЕБОВ А.М., ЧЕРНЯЕВ А.П.	
Двухбарьерные GaAs/AlAs терагерцовые наноструктуры в режиме детектирования с внутренним усилением.....	114

АКМАЛОВ А.Э., АКСЕНОВ Е.А., КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., ЛУЧИНИН В.В., МАКСИМОВ Е.М., МИТЯГИН Ю.А., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А.	
Установка для регистрации и исследования ТГц-изображений со спектральной идентификацией.....	116
АНИСТРАТЕНКО С.С., ГАРЕЕВ Г.З.	
Дистанционное обнаружение взрывчатых веществ на основе терагерцовых технологий	118
АНИСТРАТЕНКО С.С., ГАРЕЕВ Г.З.	
Активные методы дистанционного обнаружения радионуклидов с использованием ИК лазеров и субтерагерцовых излучателей.....	120
КЛОЧКОВ А.Н., СОЛЯНКИН П.М., КЛИМОВ Е.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н., ПУШКАРЕВ С.С., МАЛЬЦЕВ П.П., ШКУРИНОВ А.П., ГАЛИЕВ Г.Б.	
Терагерцовое излучение фотопроводящих антенн на основе сверхрешёточных структур {LT-GaAs/GaAs:Si}	122
НОМОЕВ С.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н.	
Моделирование, разработка и исследование электрофизических характеристик терагерцовых фотопроводящих антенн	124
ТОРХОВ Н.А., БАБАК Л.И., КОКОЛОВ А.А., ПЕТРОВ И.И.	
Экстракция параметров линейной модели кристалла диода шоттки ТГц-диапазона	126
ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА	
АМАСЕВ Д.В., КАЗАНСКИЙ А.Г., КОЗЮХИН С.А., МИХАЛЕВИЧ В.Г.	
Особенности фотоэлектрических свойств металлоорганических перовскитов на основе галогенидов свинца	128
ЛАЗАРУК С.К., ЛЕШОК А.А., ДОЛБИК А.В., ЛЕ ДИНЬ ВИ, КОЗЛОВА Т.А., КАРГИН Н.И., ЛАБУНОВ В.А.	
Объемные фотонные структуры на основе кремния с оптическими межсоединениями через микроканальную пластину	130
РУДЕНКО М.В., ЕРМАЧИХИН А.В., ЛИТВИНОВ В.Г., ВИШНЯКОВ Н.В., ГАПОНЕНКО Н.В., НИКИТЕНКО В.Р., ЗАВАДСКИЙ С.М.	
Вольт-фарадный гистерезис наноструктурированного титаната стронция.....	132
ПРИЩЕПА С.Л., ДАНИЛЮК А.Л., КУХАРЕВ А.В., LE NORMAND F.	
Влияние УНТ на магнитостатическую изоляцию плотноупакованных наночастиц ферромагнетика.....	134
ХОЛОВ П.А., ГАПОНЕНКО Н.В., ГОЛОСОВ Д.А., КОЛОС В.В., ШЕВЧЕНКО А.А., СОХРАБИ АНАРАКИ Х., КАРГИН Н.И.	
Конденсаторные структуры на основе плёнок титаната стронция, сформированных золь-гель методом и магнетронным распылением.....	136

СОКОЛОВ И.С., АВЕРЬЯНОВ Д.В., КАРАТЕЕВ И.А., ТОКМАЧЁВ А.М., ПАРФЁНОВ О.Е., ТАЛДЕНКОВ А.Н., КОНДРАТЬЕВ О.А., СТОРЧАК В.Г. Интерфейсные явления в эпитаксиальных гетероструктурах EuO/графен и Eu/графен	138
ГИМАЛЬДИНОВА М.А., МАСЛОВ М.М., КАТИН К.П., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И. Компьютерное моделирование низкоразмерных ковалентных структур на основе высокоэнергетических молекул CL-20.....	140
ДОЛИНСКИЙ И.Ю., НОВИКОВ Н.В., ГИМАЛЬДИНОВА М.А., КАТИН К.П., МАСЛОВ М.М., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И. Взаимодействие азотных дефектов замещения в азафуллеренах $C_{20-n}N_n$ ($n = 0 - 4$).....	142
НОВИКОВ Н.В., ДОЛИНСКИЙ И.Ю., ГИМАЛЬДИНОВА М.А., КАТИН К.П., МАСЛОВ М.М., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И. Влияние механических деформаций на энергетические и электронные свойства углеродных полипризматов	144
БЕЛОГОРОХОВ И.А., БЕЛОГОРОХОВА Л.И. Физические свойства композиционных материалов на основе хлорофилла	146
БЕЛОГОРОХОВ И.А., БЕЛОГОРОХОВА Л.И. Оптические свойства композиционных материалов на основе макроциклических комплексов.....	148
ТОРХОВ Н.А., НОМОЕВ А.В., БАЛДАНОВ Б.Б. Янус-подобные наночастицы как активные элементы широкополосных радиопоглощающих систем.....	150
ШАРКОВ А.И., КЛОКОВ А.Ю., ЦВЕТКОВ В.А., АМИНЕВ Д.Ф. Пространственная анизотропия дисперсии ПАВ в структурах металл / лангасит	152
ПОРОХОНЬКО Ю.А., ШОСТАЧЕНКО С.А., ЗАХАРЧЕНКО Р.В., БУРДЫКИН М.С. Исследование автоэмиссионных катодов на основе графеносодержащих пленок (обзор).....	154
ЛИТУН Я.Б., КОНОНЕНКО О.В., ЧИЧКОВ М.В. Технологические особенности нано-электромеханических ключей на основе графена.....	156
СМИРНОВА М.О., БОРМАШОВ В.С., БАЛАКШИН Ю.В., ГОЛОВАНОВ А.В., КАРГИН Н.И., КОРОВИН О.В., КУКИН Н.С., МУРАШОВ А.Г., СМУРОВ С.В., ТАРЕЛКИН С.А., ТИМОФЕЕВ А.А., ТРОФИМОВ С., ШЕМУХИН А.А. Создание массива одиночных NV-центров в синтетическом алмазе для разработки модуля памяти квантового компьютера.....	158
Именной указатель авторов	160

**РОЛЬ СПИН-ОРБИТАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В РЕЖИМЕ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА
В СИСТЕМАХ InGaAs/InAlAs С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ InAs**

**С.В. Гудина¹, Ю.Г. Арапов¹, Е.В. Ильченко¹, В.Н. Неверов¹, А.П. Савельев¹,
С.М. Подгорных¹, Н.Г. Шелушинина¹, М.В. Якунин¹, И.С. Васильевский², А.Н. Виниченко²*

¹Институт физики металлов им. М.Н. Микеева УрО РАН,
620137, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, Россия, e-mail: svpopova@imp.uran.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Каширское шоссе, 31, Москва, Россия

**THE ROLE OF SPIN-ORBIT INTERACTION IN THE QUANTUM HALL REGIME
IN THE n- InGaAs/InAlAs SYSTEMS WITH HIGH InAs CONTENT**

**S.V. Gudina¹, Yu.G. Arapov¹, E.V. Ilchenko, V.N. Neverov¹, A.P. Savelyev¹,
S.M. Podgornykh¹, N.G. Shelushinina¹, M.V. Yakunin¹, I.S. Vasil'evskii², A.N. Vinichenko²*

¹M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
S. Kovalevskaya str. 18, 620990, Yekaterinburg, Russia, svpopova@imp.uran.ru

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Kashirskoe shosse, 31, 115409.

The longitudinal ρ_{xx} and Hall ρ_{xy} resistances in magnetic fields up to 9 T and temperature from 1.8 to 30 K in the structures n-In_{0.9}Ga_{0.1}As/In_{0.81}Al_{0.19}As were measured. The combination of the observed box-like behavior of the σ_{xx} (B) for odd filling factors at $T \geq 10$ K with a "classical" type of localization length divergence at $T \approx (2 \div 10)$ K indicates the essential role of the spin-orbit interaction in the processes of localization-delocalization of carriers in the system under study.

При традиционном рассмотрении режима целочисленного квантового эффекта Холла (КЭХ) предполагается, что в центре каждого уширенного уровня Ландау существует только одно делокализованное состояние. Картина существенно усложняется, когда индуцированная беспорядком ширина уровня Ландау, Γ , становится сравнимой с величиной зеемановского расщепления Δ . Будет ли при этом спиновое расщепление пика проводимости σ_{xx} наблюдаемым, определяется как температурой, T , так и степенью беспорядка: пики сливаются с ростом T при характерной температуре, которая является функцией параметра Δ/Γ . Имеется ряд экспериментальных свидетельств того, что перекрытие зеемановских уровней может сильно затруднить локализацию электронных состояний [1–3].

Исследованы продольное ρ_{xx} и холловское ρ_{xy} сопротивления структуры с квантовой ямой n-In_{0.9}Ga_{0.1}As/In_{0.81}Al_{0.19}As с концентрацией $n = 6.8 \times 10^{15} \text{ м}^{-2}$ и подвижностью $\mu = 20 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ в магнитных полях, B , до 9 Тл и температурах T от 1.8 до 30 К. Для 2D-структур на основе InGaAs

характерно наличие сильного спин-орбитального (СО) взаимодействия, которое (наряду с обменным взаимодействием) определяет спиновое расщепление уровней Ландау [4].

В исследованных нами образцах при достаточно высоких температурах, $T^{\circ} = (10 \div 30)$ К, в области нечетных факторов заполнения, $\nu = 5, 7, 9$, наблюдается явно выраженная П-образная (box-like в терминах работы [5]) форма кривых $\sigma_{xx}(B)$: $\sigma_{xx}^{\circ} \sim e^2/h$ в интервале магнитных полей ΔB , охватывающем два спин-расщепленных пика, и быстро спадает вне этого интервала. При понижении температуры для каждого фактора заполнения ($\nu = 5, 7, 9$) формируется два отдельных (уширенных) пика. При $T^{\circ} \leq 10$ К зависимость ширины каждого из спин – отщепленных пиков $\sigma_{xx}, \Delta B$, подчиняется скейлинговому закону $\Delta B(T) \sim (T/T_0)^{\kappa}$ с $\kappa \approx 0.75$ вплоть до температуры $T^{\circ} \approx 2$ К.

Наблюдаемое поведение соответствует представлениям, развитым в [5] для электронных систем с плавным примесным потенциалом в условиях, когда два уширенных беспорядком зеемановских уровня Ландау сильно перекрываются, $\Gamma^{\circ} \geq \Delta$. Показано, что в этой ситуации СО-взаимодействие является причиной радикального изменения перколяционной сетки и природы локализации в режиме КЭХ. При достаточно высоких температурах, когда длина фазовой когерентности, L_{ϕ} , становится меньше квантовой длины локализации в центре между энергиями двух зеемановских уровней, $\xi(0)$, именно наличие СО – связи приводит к П – образному увеличению диссипативной проводимости в этой области магнитных полей.

Таким образом, сочетание наблюдаемого нами П – образного поведения зависимости $\sigma_{xx}(B)$ для нечетных факторов заполнения при $T^{\circ} \geq 10$ К с “классическим” типом расходимости радиуса локализации, $\xi(T) \sim (T/T_0)^{4/3}$, при $T^{\circ} \approx (1 \div 10)^{\circ}$ К свидетельствует о существенной роли спин-орбитального взаимодействия в процессах локализации – делокализации носителей в исследованной системе InGaAs/InAlAs.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Электрон», Г.р.№ АААА-А18-118020190098-5, при поддержке РФФИ № 18-02-00172.

Литература

1. S.W. Hwang, H.P. Wei, L.W. Engel, D.C. Tsui, Phys. Rev. B **48**, 11416 (1993).
2. D. Shahar, M. Hilke, C.C. Li, D.C. Tsui, S.L. Sondhi et al., Sol.Stat.Comm. **107**, 19 (1998).
3. H.P. Wei, S.W. Hwang, D.C. Tsui, and A.M. Pruisken, Surf. Sci. **229**, 34 (1990).
4. С.С. Криштопенко, К.П. Калинин, В.И. Гавриленко, Ю.Г. Садофьев, М. Goiran, ФТП, **46**, 1186 (2012).
5. D.G. Polyakov, M.E. Raikh, Phys.Rev.Lett. **75**, 1368 (1995).

**КВАЗИДВУМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**А.А. Васильченко¹, Г.Ф. Копытов*

Кубанский государственный университет
Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, дом 149, e-mail: a_vas@mail.ru

QUASI-TWO-DIMENSIONAL ELECTRON-HOLE LIQUID IN MAGNETIC FIELD

**A.A. Vasilchenko, G.F. Kopytov*

Kuban State University
Russia, 350040, Krasnodar, Stavropol'skaya, 149, e-mail: a_vas@mail.ru

The equilibrium density of electron-hole pairs for the Si/SiGe/Si structure in a perpendicular magnetic field is calculated. It is shown that in the range of magnetic fields from 0 to 50 T the density of electron-hole pairs increases by a factor of two for the three-component EHL and by almost three times for the two-component pair.

Хорошо известно, что плотность трехмерной электронно-дырочных жидкости (ЭДЖ) сильно увеличивается с возрастанием напряженности магнитного поля. Например, в антимониде индия [1] равновесная концентрация электронно-дырочных пар увеличивалась более чем в два раза при изменении магнитного поля от 2.5 Т до 5.5 Т.

Менее изучены свойства ЭДЖ в низко-размерных полупроводниковых структурах. Недавно в работе [2] показана возможность образования трехкомпонентной ЭДЖ в структурах Si/Si_{1-x}Ge_x/Si. Трехкомпонентная ЭДЖ содержит как тяжелые, так и легкие дырки и при увеличении содержания германия в квантовой яме происходит переход к двухкомпонентной ЭДЖ с тяжелыми дырками. В работе [3] получено аналитическое выражение для энергии квазидвумерной ЭДЖ при учете двух типов дырок. Результаты вычислений по предложенной нами модели расчета [3] свойств квазидвумерной ЭДЖ в SiGe квантовых ямах достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными [2]. В настоящей работе эта модель обобщается для ЭДЖ в перпендикулярном магнитном поле.

Считаем, что магнитное поле влияет только на продольное движение носителей заряда. Тогда для вычисления энергии электронно-дырочных пар можно использовать результаты работы [3], заменив продольную кинетическую энергию носителей заряда на энергию носителей заряда в магнитном поле.

Результаты вычислений приведены на рис. 1. При низких магнитных полях видны осцилляции плотности, связанные с изменением заселенно-

стей уровней Ландау. Линейные зависимости плотности от магнитного поля связаны с тем, что в основном состоянии всегда есть полностью заполненный носителями заряда уровень Ландау. Резкие скачки в плотности соответствуют переходу к новому, полностью заполненному уровню Ландау.

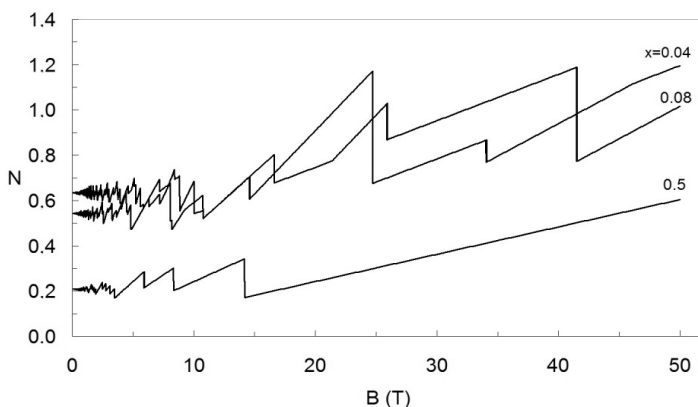


Рис. 1. Зависимость плотности электронно-дырочных пар от магнитного поля

Например, при $x = 0.04$ скачок плотности вблизи 25 Т соответствует переходу из состояния с фактором заполнения $\nu_{hh} = 2$ в состояние с $\nu_{hl} = 1$. При $x = 0.5$ ЭДЖ является двухкомпонентной и при $B > 14.5$ электроны и тяжелые дырки находятся на нижнем уровне Ландау. Отметим, что в рассматриваемом диапазоне магнитных полей плотность электронно-дырочных пар увеличивается в два раза для трехкомпонентной ЭДЖ и почти в три раза для двухкомпонентной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края (проект № 16-42-230280).

Литература

1. Н.Н. Сибельдин, УФН **173**, 999 (2003).
2. С.Н. Николаев, В.С. Кривобок, В.С. Багаев, Е.Е. Онищенко, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Письма в ЖЭТФ **104**, 61 (2016).
3. А.А. Васильченко, Г.Ф. Копытов, В.С. Кривобок, Известия высших учебных заведений. Физика **61**, 3 (2018).

ОЦЕНКА ВСПЛЕСКА ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В DA-pHEMT

**А.Б. Пашковский¹, С.И. Новиков¹, Я.Б. Мартынов¹, В.М. Лукашин¹*

¹«Научно-производственное предприятие «ИСТОК» имени А.И. Шокина».
Россия, 141190, г. Фрязино, Московская область, ул. Вокзальная, д. 2а
e-mail: solidstate10@mail.ru

ELECTRONS DRIFT VELOCITY OVERSHOOT ESTIMATION IN DA-pHEMT

**A.B. Pashkovskii¹, S.I. Novikov¹, Y.B. Martinov¹, V.M. Lukashin¹*

¹JOINT-STOCK COMPANY «RESEARCH & PRODUCTION CORPORATION «ISTOK»
named after A.I. Shokin»
Russia, 141190 Fryazino, Moscow Region, Vokzalnaya St. 2a, e-mail: solidstate10@mail.ru

The first of the results of the electron drift velocity overshoot simulation in various types of transistor heterostructures are presented. The simulation is based on the solution of the self-consistent Schrödinger and Poisson equations and the system of hydrodynamic equations. It is shown that for the electron transport under the gate of the transistor, donor-acceptor doping creates even more favorable conditions than heterostructures with deeper quantum wells obtained by the increasing of the band gap.

Хорошо известно, что характеристики современных полевых транзисторах с длинами затвора порядка десятых долей микрона сильно зависят от особенностей нелокального разогрева электронов в активной области. Проведённые ранее исследования позволяли успешно проектировать полевые транзисторы с характеристиками близкими к оптимальным без детальных теоретических исследований. Ситуация резко изменилась с появлением транзисторов на гетероструктурах с двусторонним донорно-акцепторным легированием (DA-pHEMT) [1], в которых по предположениям и оценкам обработки экспериментальных результатов дрейфовая скорость электронов под затвором существенно отличается от скорости в приборах на обычных структурах [2–3]. Дополнительный интерес к этой проблеме подстегнула разработка гетероструктур с глубокими квантовыми ямами [4]. Поэтому представляет интерес хотя бы на качественном уровне исследовать особенности нелокального дрейфа электронов в таких приборах.

В проведенной работе оценки проводились на основе самосогласованного решения феноменологической системы гидродинамических уравнений описывающих динамику электронов в продольном направлении, и уравнений Шредингера и Пуассона, описывающих потенциальный

рельеф и квантовые уруни в направлении перпендикулярном поверхности.

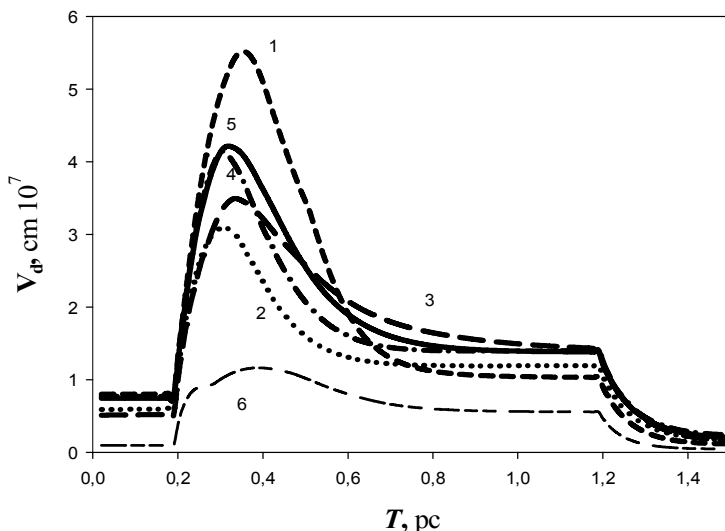


Рис.1 Отклик дрейфовой скорости электронов на импульс сильного поля (1 кВ/см 20кВ/см – 1 кВ/см, $T = 1$ пс) 1 – чистый GaAs, 2 – традиционная гетероструктура AlGaAs – GaAs – AlGaAs, 3 – гетероструктура AlGaAs – GaAs – In_{0,2}Al_{0,8}As – GaAs – In_{0,2}Al_{0,8}As, 4 – гетероструктура AlGaAs – GaAs – AlGaAs с двухсторонним донорно – акцепторным легированием, 6 – AlGaAs $N_d = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

На рис.1 представлены результаты расчёта отклика дрейфовой скорости электронов на импульс сильного поля. Видно, что, как и предполагалось, минимальный всплеск дрейфовой скорости наблюдается в обычных структурах с двойным легированием канала. Интересно отметить, что в структуре In_{0,2}Al_{0,8}As – GaAs – In_{0,2}Al_{0,8}As всплеск дрейфовой скорости гораздо выше, что напрямую связано с большим разрывом зон на границе гетероперехода (0.5 эВ, а не 0.3 эВ). Однако, не смотря на то, что эффективная высота барьеров за счет этого возрастает почти втрое, для горячих электронов этого оказывается недостаточно и максимальный всплеск демонстрирует структура с донорно – акцепторным легированием.

Литература

1. В.М. Лакашин et al., Письма в ЖТФ, **38**(17), 84-89 (2012).
2. А.А. Борисов et al., Письма в ЖТФ, **42**(16), 41-47 (2016).
3. Д.Ю. Протасов et al., Письма в ЖТФ, **44**(6), 77-83 (2018).
4. И.С. Василевский, А.Н. Виниченко, Н.И. Каргин, Сборник тезисов “Мокеровские чтения-2017”, 28-29 (2017).

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ГОРЯЧЕГО ДЭГ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
С АКУСТИЧЕСКИМИ ФОНОНАМИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ DA-PHEMT
С ДВУМЯ ЗАПОЛНЕННЫМИ ПОДЗОНАМИ РАЗМЕРНОГО КВАНТОВАНИЯ**

****Д.Ю. Протасов^{1,2}, А.К. Бакаров¹, А.И. Торопов¹, К.С. Журавлев^{1,3}***

¹Институт физики полупроводников им. Академика А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, 630090, пр-т Академика Лаврентьева, 13, e-mail: protasov@isp.nsc.ru

²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, 630073, пр-т Карла Маркса, 20

³Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, д. 2, Россия.

THE ENERGY RELAXATION OF HOT 2DEG VIA INTERACTION WITH ACOUSTIC
PHONONS IN DA-PHEMT HETEROSTRUCTURES WITH TWO FILLED SUBBANDS

****D.Yu. Protasov^{1,2}, A.K. Bakarov¹, A.I. Toropov¹, K.S. Zhuravlev^{1,3}***

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
13, Lavrentiev avenue, Novosibirsk, Russia, 630090, e-mail: protasov@isp.nsc.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx avenue, Novosibirsk, Russia, 630073

³Novosibirsk State University, 2, Pirogov street, Novosibirsk, Russia, 630090.

It is shown in the paper, that in the DA-pHEMT heterostructures with two filled subbands, the Shubnikov-de Haas oscillation spectrum consists of 5 main bands: two bands associated with the ground and first excited subbands, two bands with sum and difference frequencies, and doubled-frequency band of the ground subband. With increasing electronic temperature, the oscillations for all bands, except for the band with the difference frequency, decrease because of the influence of the temperature damping factor. The band with a difference frequency describes the resonance effect between the Landau levels for the two subbands and has weaker temperature dependence. Therefore, for high values of the pulling electric field (corresponding to the maximum electron temperatures), the difference frequency is dominated by the oscillation spectrum.

Гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с донорно-акцепторным легированием (donor-acceptor doped pseudomorphic high electron mobility transistor – DA-pHEMT) позволили увеличить удельную выходную мощность СВЧ транзисторов на их основе на 50% – до 1.7 Вт/мм на частоте 10 ГГц [1]. В этих гетероструктурах концентрация двумерного электронного газа (ДЭГ) увеличена до $(4\div 5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при концентрации доноров в δ -слоях $(7\div 8) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ без появления заметной параллельной проводимости по областям донорных слоев [2]. Такая высокая концентрация ДЭГ

приводит к заполнению двух первых подзон размерного квантования в квантовой яме (КЯ), причем концентрация ДЭГ в нижней и верхней зонах отличаются менее чем в два раза ($n_1 \approx n_2$).

Ранее осцилляции Шубникова-де Газа были использованы для изучения процессов энергетической релаксации горячих электронов в гетероструктурах $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с двумя заполненными подзонами [3] при низких температурах. Концентрация ДЭГ в верхней подзоне была намного меньше концентрации ДЭГ в нижней подзоне: $n_1 \gg n_2$. Было показано, что при заполнении второй подзоны доминирующим механизмом релаксации становилась релаксация на пьезоэлектрической моде акустических фононах, причем пьезоэлектрические постоянные были разными для разных подзон.

В данной работе мы представляем результаты исследований процессов энергетической релаксации при помощи осцилляций Шубникова-де Газа (ШдГ) в случае более сильного заполнения верхней подзоны размерного квантования.

Была исследована зависимость осцилляций ШдГ от электронной температуры для гетероструктур DA-pHEMT с концентрацией ДЭГ до $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и различным содержанием индия в КЯ. Осцилляции ШдГ измеряли с помощью сверхпроводящего соленоида, погруженного в жидкий гелий. Электронная температура ДЭГ регулировалась силой постоянного тока, пропускаемого через холловские структуры. Спектр осцилляций ШдГ состоял в общем случае из пяти полос. Амплитуды осцилляций с частотами, соответствующими первой и второй подзонам размерного квантования, были выделены из измеренного сигнала аппроксимацией теоретическими выражениями [4]. Наименьшее тянущее электрическое поле соответствовало равновесному ДЭГ, находящемуся при температуре 4.2 К. Увеличение электронной температуры в каждой подзоне при нагревании электрическим полем определялось по уменьшению амплитуды соответствующего колебания. Время релаксации по энергии было получено из энергетического баланса между джоулевым нагревом и возвратом избыточной тепловой энергии электронов к фононам.

Литература

1. V.M. Lukashin, A.B. Pashkovskii, K.S. Zhuravlev et al., *Semiconductors*, **48**, 666-674 (2014).
2. D.V. Gulyaev, K.S. Zhuravlev, A.K. Bakarov et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**(9), 095108 (2016).
3. E. Tiras, M. Cankurtaran, H. Çelik et al., *Phys. Rev. B*, **64**, 08530 (2001).
4. D.R. Leadley, R. Fletcher, R.J. Nicholas et al., *Phys. Rev. B*, **46**(19), 12439-12447 (1992).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА В pHEMT
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InGaAs/AlGaAs С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ
МЕТОДОМ ФОТО-ХОЛЛА**

**Н.Б. Барышников, Ю.Д. Сибирмовский, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко,
Н.И. Каргин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: n.baryshnikov10@gmail.com

**INVESTIGATION OF ELECTRON TRANSPORT IN InGaAs/AlGaAs pHEMT
HETEROSTRUCTURES WITH DIFFERENT DOPING LEVELS
BY PHOTO-HALL METHOD**

**N.B. Baryshnikov, Y.D. Sibirmovsky, I.S. Vasil'evskii, A.N. Vinichenko, N.I. Kargin*

National Research Nuclear University «MEPhI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: n.baryshnikov10@gmail.com

Electron transport in single delta-Si doped pHEMT heterostructures with donor concentration $(1.0 \div 11.2) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ was studied in a temperature range of $77 \div 320 \text{ K}$. The measurements were carried out in the dark and under the optical illumination with different wavelengths. Temperature dependences of electron mobility differ. Samples with higher doping showed decrease of electron mobility under illumination at temperatures below $140 \div 160 \text{ K}$. For the lightly doped samples experiments showed increase of mobility in whole temperature range.

Псевдоморфные pHEMT-структуры на основе квантовой ямы (КЯ) InGaAs/AlGaAs вызывают особый интерес в области сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники [1, 2]. Использование таких структур обусловлено достижением высоких значений концентрации и подвижности электронов за счет пространственного разделения двумерного электронного газа (ДЭГ), локализованного в КЯ, и ионов легирующей примеси.

Изменение концентрации и подвижности при освещении электромагнитным излучением оптического и инфракрасного диапазонов имеет особое значение для легированных структур [3, 4]. В данной работе впервые исследовано влияние света с различной длиной волны на электронный транспорт в pHEMT гетероструктурах с δ -Si легированием в диапазоне $(1.0 \div 11.2) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ в интервале температур $77 \div 320 \text{ K}$.

На рис. 1а представлена зависимость холловской подвижности от температуры для образца № 258 с $N_d = 3.41 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Как видно из рисунка в области низких температур освещение вызывает заметное уменьшение подвижности относительно подвижности в темноте. Данное умень-

шение объясняется ростом рассеяния на ионизированных примесях в δ -Si слое [5], эффектами, связанными с параллельной проводимостью в дельта слое, а также с заполнением второй подзоны размерного квантования [6]. Свет перестает влиять на подвижность при температурах $140 \div 160$ К. Концентрация электронов возрастает при освещении, а ее температурная зависимость имеет минимум в той же области температур. Качественно зависимости одинаковы для всех образцов с $N_d > 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

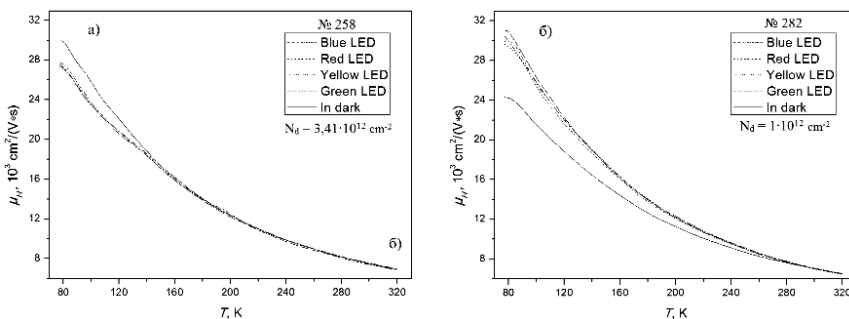


Рис. 1. Температурные зависимости $\mu_n(T)$ при $N_d = 3.41 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (а) и $N_d = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (б) при освещении светодиодами с разной длиной волны и в темноте

При меньшей степени легирования (рис. 1б) наблюдается увеличение холловской подвижности при освещении, вероятно связанное с отсутствием глубоких доноров Si, а также с экранированием фотоэлектронов неоднородностей потенциала. Концентрация заметно увеличивается под воздействием света, однако, в отличие от образцов с большим легированием, она монотонно уменьшается с ростом температуры.

Литература

1. N. Koguchi and K. Ishige, Jpn. J. Appl. Phys., 321993, 2052 (1993).
2. A. Luque, A. Martí, Phys. Rev. Lett., **78**(26), 5014 (1997).
3. M. Jo, T. Mano, K. Sakoda, Nanotechnology, **22**(33), 335201 (2011).
4. J. Wu et al, Nano. Lett., **10**(4), 1512–1516 (2010).
5. А.Н. Виниченко и др., ФТП, **48**(12), 1660 (2014).
6. M. van der Burgt et al., Phys. Rev. B, **52**, 16 (1995).

**КВАНТОВЫЙ МАГНЕТОТРАНСПОРТ В ОДНОСТОРОННЕ δ -ЛЕГИРОВАННЫХ
РHEMT ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ AlGaAs/InGaAs/GaAs
С ВЫСОКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ**

^{}D.A. Safonov¹, A.N. Vinichenko^{1,2}, N.I. Kargin¹, I.S. Vasil'evskii¹*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: safonov.dan@mail.ru

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, Россия

**QUANTUM MAGNETOTRANSPORT IN ONE-SIDED δ -DOPED PHEMT
HETEROSTRUCTURES AlGaAs/InGaAs/GaAs WITH HIGH ELECTRON DENSITY**

^{}D.A. Safonov¹, A.N. Vinichenko^{1,2}, N.I. Kargin¹, I.S. Vasil'evskii¹*

¹National research nuclear University «MEPhI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: safonov.dan@mail.ru

²Immanuel Kant Baltic Federal University. 236041, Kaliningrad, Russia.

Quantum electron transport in single delta-Si doped pseudomorphic quantum wells with increasing donor concentration N_d analyzed in a temperature range (2.1 ÷ 8.4) K. Electron effective masses m^* , transport τ_t and τ_q quantum scattering times were calculated from Shubnikov-de Haas Oscillations. $\tau_t(N_d)$ and $\tau_q(N_d)$ dependences increase and then decrease at higher electron concentration. τ_t/τ_q ratio decreases with increasing Si donor concentration, while effective mass value is increasing.

Псевдоморфные РHEMT квантовые ямы (КЯ) AlGaAs/InGaAs/AlGaAs на сегодняшний день являются наиболее используемыми гетероструктурами в СВЧ электронике. Несмотря на это, фундаментальное описание электронных процессов всё ещё отстаёт от практики их прикладного применения, хотя высокая электронная плотность ($n_s > 1.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) отличает их от классических НЕМТ.

Для исследования электронного транспорта была выращена серия образцов РHEMT с КЯ Al_{0.25}Ga_{0.75}As/In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs и односторонним дельта-легированием Si через спейсер 5.5 нм. Для проведения измерений на структурах формировались мезы типа «Холловский мост» с помощью фотолитографии и жидкостного травления. Образцы исследовались при помощи измерения магнетосопротивления и холловского сопротивления при температурах (2.1 ÷ 8.4) К в магнитном поле до 6 Тл. Во всех образцах наблюдается эффект Шубникова-де Гааза и квантовый эффект Холла.

Моделирование зонной структуры показало, что высокая концентрация легирующей примеси в 1 δ -РHEMT КЯ шириной 10.5 нм, приводит к формированию квазитреугольного профиля дна КЯ. Фурье-анализ осцил-

лаций Шубникова-де Гааза при температурах (2.1 ÷ 8.4) К показал наличие только одной частоты осцилляций. Определенная концентрация электронов в нижней подзоне КЯ хорошо соответствовала холловской концентрации электронов, что свидетельствует о заполнении только одной подзоны размерного квантования. Определенные методом Дингла квантовое τ_q и транспортное τ_t времена релаксации импульса немонотонно зависят от концентрации электронов n_s . При $n_s < 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ наблюдается возрастание τ_t и τ_q , а при $n_s > 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ наблюдается убывание. Возрастание связано с увеличением импульса Ферми двумерного газа, переход к убыванию τ_t – с ростом доли рассеяния электронов на большие углы из-за туннельной деградации спейсера [1]. Моделирование подвижности электронов с учетом пространственных профилей электронных волновых функций подтверждает немонотонное изменение τ_t и τ_q и снижение отношения τ_t/τ_q . Эффект объясняется увеличением туннелирования электронов в широкозонный легированный барьер AlGaAs из-за понижения потенциала дна зоны проводимости в области дельта-слоя. По температурным изменениям амплитуды осцилляций были определены эффективные массы электронов в КЯ и коэффициент непараболичности, равный 0.133 $m_0/\text{эВ}$. Наблюдается увеличение эффективной массы в КЯ при $n_s > 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, которое коррелирует с резким снижением подвижности электронов и связывается также с увеличением проникновения электронов основной подзоны КЯ в широкозонный спейсер.

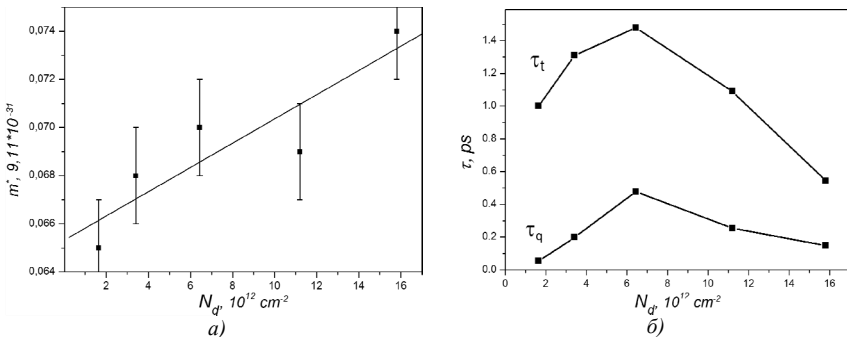


Рис. 1. Зависимости эффективной массы электронов (а) и времени релаксации импульса (б) от концентрации кремния в δ -слое

Литература

1. А.Н. Виниченко и др., ФТП, **48**(12) (2014).

**ОСОБЕННОСТИ ДРЕЙФА И ДИФФУЗИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В ТОНКИХ СЛОЯХ ДЛЯ ПРИБОРОВ ОРГАНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

^{}Д.В. Никеров, В.Р. Никитенко, Н.А. Королёв*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: dnik@bk.ru

**PECULIARITIES OF DRIFT AND DIFFUSION OF CHARGE CARRIERS
IN THIN LAYERS OF ORGANIC ELECTRONIC DEVICES**

^{}D.V. Nikerov, V.R. Nikitenko, N.A. Korolev*

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
115409, Russian Federation, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: dnik@bk.ru

A theoretical analysis of the drift and diffusion of charge carriers was carried out for thin layers of an organic crystal, i.e. the material with a very small energy disorder, but the hopping nature of the transport. The results of the theoretical analysis are superimposed on the Monte-Carlo numerical simulation, demonstrating the importance of diffusion current in thin films.

В последнее время ведутся попытки измерения подвижности носителей в тонких (порядка 100 нм) слоях, типичных для органической электроники, во времяпролётных экспериментах (ВПЭ) с использованием генерационных слоёв [1]. В связи с этим встаёт вопрос о роли диффузии и адекватных граничных условиях при теоретическом описании. В данной работе исследованы аналитические решения уравнения дрейфа-диффузии [2] с постоянными коэффициентами диффузии D и подвижности μ , что справедливо при исчезающе малом энергетическом беспорядке. Начальное условие соответствует приповерхностной генерации носителей заряда в виде очень тонкого слоя на левой границе. Граничное условие (г.у.) на правой границе отвечает «свободному стеканию» носителей (концентрация на плюс бесконечности равна нулю), в то время как г.у. на левой границе задаётся двумя способами. Первый отвечает типичному предположению, что левый край также не возмущает движение носителей, что даёт хорошо известное решение для концентрации в бесконечной среде («гауссов пакет»). Другой способ – условие, что ток проводимости на левой границе равен нулю (блокирующий контакт, что типично для ВПЭ). Для этого случая аналитическое решение получено в данной работе.

Для обоих аналитических решений вычислены зависимости переходного тока от времени, наложенные на данные численного моделирования методом Монте-Карло (МК). При численном моделировании прыжки в

область $x < 0$ запрещены, алгоритм моделирования описан в работе [3]. Графики зависимостей плотности тока от времени представлены на рис. 1. Значения по оси абсцисс нормированы на время прыжка $t_r = 2.2$ нс. Значения параметров: постоянное поле $F_0 = 10^7$ В/м, температура $T = 300$ К, поверхностная плотность заряда $\sigma_0 = 1$ м⁻², постоянная решётки $a_0 = 1$ нм.

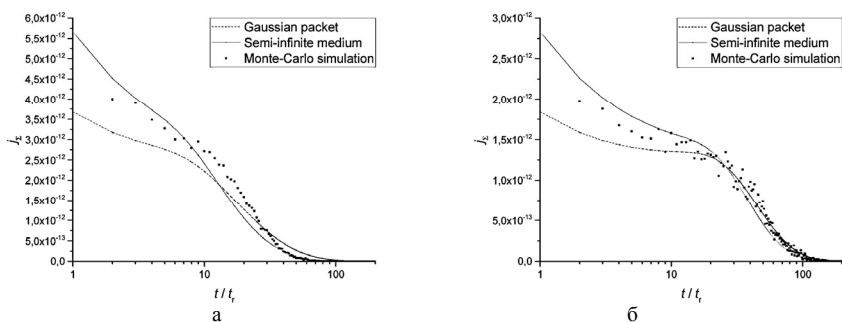


Рис. 1. Зависимости плотности тока от времени для толщин слоя (а) $L = 10$ и (б) 20 нм

Результаты вычислений показывают, что данные МК более соответствуют второму г.у. ($j_\Sigma = 0$), при этом точнее учитывается диффузионная составляющая тока (дрейфовый ток не зависит от времени до пролёта). Некоторое завышение тока аналитическим решением связано с нефизической бесконечностью градиента концентрации при малых (порядка времени прыжка) временах. В случае малой (до 40 нм) толщины интервал постоянного тока («полочка») практически отсутствует благодаря вкладу диффузии, и форма сигнала напоминает дисперсионный транспорт [1], несмотря на отсутствие энергетического беспорядка. При больших временах решения совпадают. Расчёты показывают, что вид г.у. (соответственно, диффузионный ток) практически не влияет на определение времени пролёта при толщине слоя не менее 40 нм при типичной напряжённости поля 10^7 В/м. Дальнейшая работа связана с учётом эффектов энергетического беспорядка.

Литература

1. J.M. Lupton et al., Phys. Rev. B, **63**, 155206 (2001).
2. A.P. Tyutnev et al., Chemical Physics, **457**, 122-128 (2015).
3. Н.А. Королёв, В.Р. Никитенко, ФТП, **49**, 1694-1699 (2015).

**ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ И ПОДВИЖНОСТЬ
ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ n-GaAs/AlGaAs:Si**

**Е.В. Богданов, Н.Я. Минина*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, e-mail: bev@mig.phys.msu.ru

**UNIAXIAL COMPRESSION INFLUENCE ON ELECTRONS CONCENTRATION
AND MOBILITY IN n-GaAs/AlGaAs:Si HETEROSTRUCTURE**

**E.V. Bogdanov, N.Ya. Minina*

Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991 Moscow, Leninskie Gory 1, e-mail: bev@mig.phys.msu.ru

Transport characteristics (resistivity, Hall effect) and quantum oscillations of magnetoresistance in a 2D electron system in high quality n-GaAs/Al_{0.29}Ga_{0.71}As:Si single heterostructures, grown by MBE epitaxy on (001) GaAs substrate and characterized (at T = 4.2 K in the dark) by initial electron concentration $n = 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and mobility $\mu_{\text{dark}} = 2.2 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, were investigated under external [110] uniaxial compression up to P = 3.5 kbar in the dark and after illumination.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния одноосного сжатия до давления P = 3.5 кбар вдоль направления [110] на сопротивление, эффект Холла и осцилляции магнетосопротивления двумерных электронов в высококачественных гетероструктурах n-GaAs/Al_{0.29}Ga_{0.71}As:Si в условиях экранирования и в режиме задержанной фотопроводимости при температуре T = 1.7 К.

Исследованные структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из (001) GaAs и характеризовались в условиях экранирования при температуре T = 4.2 К исходной концентрацией электронов $n = 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ при подвижности $\mu_{\text{dark}} = 2.2 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Отсутствие каналов параллельной проводимости подтверждалось совпадением значений концентрации электронов, рассчитываемых из эффекта Холла и периода осцилляций магнетосопротивления. В качестве источника освещения использовался инфракрасный фотодиод с энергией излучения $\hbar\nu = 1.32 \text{ эВ}$, что меньше, чем величина энергетической щели $E_g = 1.67 \text{ эВ}$ в Al_{0.29}Ga_{0.71}As при T = 1.7 К.

Было установлено, что в недеформированных образцах при переходе в режим задержанной фотопроводимости как концентрация, так и подвижность двумерных электронов в квантовой яме возрастали приблизи-

тельно в 2.5 и 4 раза соответственно. Качественно этот результат достаточно просто объясняется фотоактивацией глубоких DX-центров, связанных с легирующей примесью Si и отвечающих за задержанную фотопроводимость, которая сопровождается уменьшением числа находящихся за спейсером рассеивающих центров.

Если в ходе измерений в условиях экранирования при сжатии не наблюдалось заметного изменения концентрации и подвижности электронов в квантовой яме, то в режиме задержанной фотопроводимости как подвижность, так и концентрация двумерных электронов существенно уменьшались под нагрузкой. В это случае при максимальной нагрузке $P = 3.5$ кбар изменение концентрации и подвижности превышало 20% и 40% соответственно. Наблюдаемое при сжатии в режиме задержанной фотопроводимости уменьшение концентрации электронов объясняется появлением пьезоэлектрического поля, которое при $P \sim 3$ кбар уже сравнимо с электрическим полем на гетерогранице и направлено в случае сжатия по [110] от гетерограницы к подложке [1], что стимулирует туннелирование электронов из квантовой ямы через спейсер в активный слой на ионизованные состояния, в качестве которых после освещения выступают возбужденные DX-центры.

Принимая во внимание, что при температуре измерений $T = 1.7$ К основным механизмом рассеяния носителей в квантовой яме является рассеяние на ионизированных примесях в активном слое [2], и учитывая некоторые геометрические характеристики исследованных гетероструктур, оказалось возможным установить количественную связь между отношением подвижностей $\mu_{\text{illum}}/\mu_{\text{dark}}$ после освещения и в темноте с изменением концентрации электронов в квантовой яме при переходе от условий экранирования к режиму задержанной фотопроводимости для трех моделей основного состояния DX-центров: (1) DX^- – отрицательное и отдает один электрон при освещении, (2) DX^{2-} – отрицательное и отдает два электрона при возбуждении, (3) DX^0 – нейтральное. Хорошее согласие с экспериментальными данными только результатов расчета по первой из рассмотренных моделей позволяет сделать вывод о том, что для DX-центров в исследованных гетероструктурах основным является состояние DX^- , и при освещении реализуется переход в состояние DX^0 : $\text{DX}^- + \hbar\nu \rightarrow \text{DX}^0 + e^-$.

Литература

1. В.Н. Кравченко, Н.Я. Минина, А.М. Савин, ЖЭТФ **118**, 1443 (2000).
2. K. Lee, M.S. Shur, T.J. Drummond, H. Morcos, J. Appl. Phys. **54**, 6432 (1983).

ПРОВОДИМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ, В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

*И.В. Алтухов¹, М.С. Казан¹, *С.К. Папроцкий¹,
Н.Б. Родионов², А.П. Большаков³, В.Г. Ральченко³, Р.А. Хмельницкий⁴*

¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 125009, Москва, Моховая, 11-7,
e-mail: s.paprotskiy@gmail.com

²ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия, 108840, Москва, Троицк

³ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва

⁴ФИ им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 119991, Москва, e-mail: roma@lebedev.ru

CONDUCTIVITY OF BORON DOPED DIAMOND AT HIGH ELECTRIC FIELDS

*I.V. Altukhov¹, M.S. Kagan¹, *S.K. Paprotskiy¹, N.B. Rodionov², A.P. Bol'shakov³,
V.G. Ral'chenko³, R.A. Khmel'nit'skiy⁴*

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

²Institute of Innovative and Thermonuclear Research, Troitsk, Moscow distr., Russia

³Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

⁴Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

Monocrystalline diamond diode structures with ohmic and Schottky contacts have been studied at room temperature. D.c. and pulsed current-voltage characteristics were measured at electric fields up to 5×10^5 V/cm. Conductivity mechanisms at different fields were identified. The concentrations of free carriers (holes) and acceptors have determined. The hole recombination times at boron acceptors have estimated. The impact ionization of boron acceptors was investigated.

Структуры на основе полупроводникового алмаза, обладающего уникальными электрическими и тепловыми характеристиками, являются перспективными для разработки источников излучения СВЧ, суб-ТГц и ТГц излучения большой мощности. В настоящей работе исследовалась проводимость диодных структур, изготовленных на основе монокристаллического алмаза, с контактами Шоттки (структуры m-i-p⁺) или омическими (p⁺-i-p⁺). Номинально нелегированные (i-тип) гомоэпитаксиальные алмазные плёнки толщиной 10÷12 мкм были выращены методом парофазного химического осаждения на сильно легированных бором алмазных подложках, синтезированных методом высокого давления / высокой температуры. В качестве материала контактов использовалась или Pt, образующая барьер Шоттки к материалу p-типа, или же сплав Ni-W, дающий омический контакт. К образцам прикладывались либо постоянное напряжение, либо треугольные импульсы напряжения с временем нарастания

0.5÷100 мкс и частотой повторения 1÷100 Гц. Из зависимостей напряжения и тока от времени восстанавливались вольтамперные характеристики (ВАХ). Измерения проводились при комнатной температуре.

Статические ВАХ структур с контактом Шоттки резко асимметричны в зависимости от полярности, что связано с асимметрией $m-i-p^+$ – структуры. При полярности, когда контакт Шоттки заперт, ток на три порядка меньше, чем при открытом контакте. Импульсные ВАХ кардинально отличаются от статических: (1) в значительном интервале напряжений ВАХ имеют линейный участок; (2) имеется область напряжений (от 0.05 до 1.5 В), где токи в обеих полярностях совпадают. Такое поведение объясняется тем, что при импульсном напряжении из-за ёмкости закорачиваются контакты Шоттки и все приложенное напряжение падает на высокоомном слое алмаза.

Из величины омической проводимости, считая подвижность дырок $\sim 1000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, можно оценить концентрацию p свободных носителей и, соответственно, концентрацию N_B нейтральных атомов акцепторной примеси бора: $p \sim 10^8 \text{ см}^{-3}$ и $N_B \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

При увеличении напряжения (амплитуды импульсов) линейная зависимость тока от напряжения переходит в квадратичную, соответствующую монополярной инжекции. При отрицательной полярности напряжения на подложке инжекция дырок, естественно, начинается при больших напряжениях. Напряжение перехода от линейной к квадратичной зависимости дает возможность оценить время рекомбинации дырок на атомах бора, которое оказалось равным $\sim 10^{-9} \text{ с}$.

В структурах p^+-i-p^+ , начиная с полей $\sim 30 \text{ кВ/см}$, наблюдается ударная ионизация примеси. Основная особенность пробоя примеси в нашем случае – отсутствие S-образности на ВАХ. Обычно S-образность при пробое водородоподобной примеси связывают с наличием возбужденных состояний, поле ионизации которых существенно меньше, чем для основного. В нашем случае большое пробойное поле приводит к тому, что все возбужденные состояния оказываются в сплошном спектре валентной зоны из-за эффекта Френкеля-Пула – понижения кулоновского потенциала примеси внешним электрическим полем.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 18-02-01079).

МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХТОНКИХ СИЛИЦЕНОВЫХ СТРУКТУР НА КРЕМНИИ

**Д.В. Аверьянов, И.С. Соколов, И.А. Каратеев, А.Н. Талденков, А.М. Токмачёв, О.Е. Парфёнов, О.А. Кондратьев, В.Г. Сторчак*

НИЦ «Курчатовский институт»
Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1, e-mail: dm_averyanov@mail.ru

MAGNETIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF ULTRATHIN SILICENE-BASED STRUCTURES ON SILICON

**D.V. Averyanov, I.S. Sokolov, I.A. Karateev, A.N. Taldenkov, A.M. Tokmachev, O.E. Parfenov, O.A. Kondratev, V.G. Storchak*

National Research Centre “Kurchatov Institute”
Russia, 123182, Moscow, Kurchatov Sq. 1, e-mail: dm_averyanov@mai.ru

Recent years have witnessed remarkable progress in engineering and exploration of 2D magnetic materials stimulated by appeal of ultra-compact spintronic devices. Compounds of silicene (a Si counterpart of graphene), intercalated with magnetic atoms, are considered to be promising materials in this regard. Theoretical studies predict silicene to exhibit a wide range of unique properties that further expands when endowed with magnetism.

Here we present studies of hexagonal polymorphs of $GdSi_2$ and $EuSi_2$, MBE-grown on Si(111). Superb crystalline quality of the films is confirmed with RHEED, XRD and TEM. SQUID-measurements reveal that ultrathin films become ferromagnetic (FM) in contrast to thick antiferromagnetic samples. The emerging FM shows its genuine 2D nature, manifesting dramatic variation of T_C as a function of low magnetic fields. Transport measurements support these results, demonstrating disappearance of a prominent feature at T_N in $\rho_{xx}(T)$ with decreasing of the thickness. Accordingly, Hall resistance curves, linear in bulk, exhibit pronounced anomalous component in 2D films, thus indicating the emergence of FM.

В последние годы наблюдается все больший прогресс в создании и исследовании магнитных материалов с низкой размерностью, побуждаемый стремлением реализовать компактные спинтронные устройства. Хотя, согласно теореме Мермина-Вагнера, дальний магнитный порядок в двумерных магнетиках должен подавляться тепловыми флуктуациями, в действительности, публикации о магнетизме в таких системах начинают появляться [1].

Вместе с тем, не прекращается поиск новых материалов, проявляющих подобные свойства. В данном контексте двумерные материалы со структурой интеркалированного магнитными ионами силицена (подобно-

го графену двумерного соединения атомов кремния) представляются весьма привлекательными. Силицен считается весьма многообещающим материалом: по теоретическим предсказаниям носители заряда в нем должны являться безмассовыми дираковскими фермионами, материал должен проявлять квантовый аномальный эффект Холла, квантовый спиновый эффект Холла, гигантское магнетосопротивление и т. д. Придание силицену магнитных свойств может расширить спектр его возможных применений.

В данной работе приводятся результаты исследования пленок $GdSi_2$ и $EuSi_2$ обладающих такой структурой [2, 3]. Их синтез производился методом молекулярно-лучевой эпитаксии путем осаждения Gd или Eu на подложку Si(111) за счет процессов диффузии.

Совместный анализ картин дифракции быстрых электронов, а также данных рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии свидетельствует о формировании монокристаллических пленок, отсутствии каких-либо посторонних фаз и резкости границ раздела.

Магнитные свойства образцов, в отличие от предыдущих работ, оказываются достаточно выраженными для их измерения с помощью СКВИД-магнитометра. Объемные пленки демонстрируют типичный антиферромагнитный переход. Однако при уменьшении толщины температурные зависимости намагниченности сильно меняются: в пленках развивается ферромагнитное упорядочение. У пленок толщиной в несколько монослоев ферромагнетизм проявляет свою истинную двумерную природу, показывая зависимость температуры перехода от слабого магнитного поля. При низких температурах кривые $M-H$ демонстрируют выраженный гистерезис, характерный для ферромагнетиков.

Фундаментальное изменение магнитного состояния отражается и на транспортных свойствах. Особенность при T_N на кривой $\rho_{xx}(T)$, проявляющаяся у толстых антиферромагнитных образцов исчезает у тонких пленок. Напротив, у них появляется являющийся индикатором возникновения ферромагнитных моментов аномальный эффект Холла, отсутствующий в толстых образцах.

Представленная работа проведена при частичной поддержке НИЦ «Курчатовский институт», РФФИ (гранты 16-07-00204, 16-29-03027 и 17-07-00170) и РНФ (грант 14-19-00662).

Литература

1. C. Gong et al., Nature **546**, 265-269 (2017).
2. A.M. Tokmachev et al., Adv. Funct. Mater. **27**, 1606603 (2017).
3. A.M. Tokmachev et al., Nature Communications, accepted (2018).

МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВАЯ ЭПИТАКСИЯ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА ГРАФЕНЕ

^{}Д.П. Борисенко¹, А.С. Гусев¹, И.В. Комиссаров^{1,2}, Н.И. Каргин¹, М.М. Грехов¹,
В.А. Лабунув^{1,2}, М.Н. Стриханов¹, Н.Г. Ковальчук²*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: liberatore@protonmail.com

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, дом 6

MOLECULAR BEAM EPITAXY OF GALLIUM NITRIDE ON GRAPHENE

^{}D.P. Borisenko¹, A.S. Gusev¹, I.V. Komissarov^{1,2}, N.I. Kargin¹, M.M. Grekhov¹,
V.A. Labunov^{1,2}, M.N. Strikhanov¹, N.G. Kovalchuk²*

¹National Research Nuclear University «MEPhI»,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: liberatore@protonmail.com

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka Street 6

We demonstrate an epitaxial and scalable growth approach to fabricate GaN films on CVD graphene by plasma-assisted molecular beam epitaxy. As substrate, we explore graphene synthesized by CVD on target substrate. Samples of graphene transferred to the surface of SiO₂. After the growth of GaN, the samples were examined using X-ray diffraction analysis.

Целью данной работы являлось исследование возможности использования графена в качестве буферного слоя для эпитаксиального роста слоёв нитридов III группы методом молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией азота на аморфных подложках. Поскольку графен имеет гексагональную решётку (рис. 1(a)), его можно рассматривать в качестве 2D буферного слоя при эпитаксии GaN (рис. 1(б)) [1, 2].

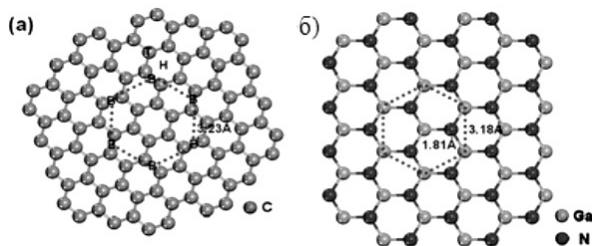


Рис. 1. (a) Константы решетки графена и (b) GaN составляют 3.23 Å и 3.18 Å, соответственно

В данной работе графен выращивался на медной фольге путем химического осаждения из газовой фазы, с использованием метана в качестве источника углерода с последующим переносом на подложку Si диаметром 2 дюйма с предварительно сформированным на ее поверхности слоем термического оксида толщиной 300 нм. GaN выращивался непосредственно на подложках графен/SiO₂/Si с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. При этом рост GaN происходил как на графене, так и на участках пластины, где графен отсутствует. Структура GaN контролировалась *in situ* методом дифракции быстрых электронов (RHEED). Экспериментальные образцы исследовались с помощью растрового электронного микроскопа LYRA3 SEM (TESCAN) и рентгеновского дифрактометра Ultima IV (Rigaku).

На рис. 2(а) и 2(б) приведены типичные РЭМ изображения поверхности плёнки GaN, выращенной на SiO₂/Si, с графеном и без него, соответственно. Как показано на рис. 2 (а), при росте на участках, покрытых слоем графена, пленка GaN имеет гладкую (2D) морфологию поверхности с переходом к относительно крупным зернам гексагональной формы (размером 200÷300 нм) в дефектных местах, что указывает на ориентированный эпитаксиальный рост. Та же пленка на участках подложки без графена имеет мелкозернистую структуру (100÷200 нм), характерную для поликристалла. Данные выводы подтверждаются рентгенодифракционными исследованиями и анализом RHEED.

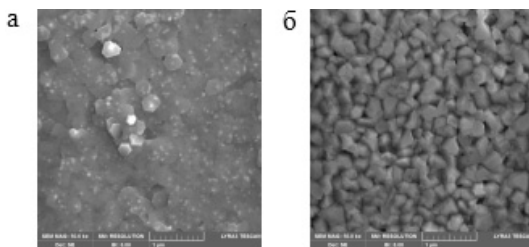


Рис.2. РЭМ-изображения (а) GaN на подложке графен/SiO₂/Si и (б) GaN на SiO₂/Si

В результате работы были получены слои GaN на поверхности SiO₂/Si методом молекулярно-лучевой эпитаксией с плазменной активацией азота с использованием плёнки графена в качестве буферного слоя.

Литература

1. S.J. Chae et al., RSC Adv., **5**, 1343–1349 (2015).
2. Z.Y. Al Balushi et al., Surf. Sci. **634**, 81–88 (2015).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗБРОСА ПОРОГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ,
ОБУСЛОВЛЕННОГО НАКОПЛЕНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА
В ОКИСЛАХ НАНОРАЗМЕРНЫХ МОП ТРАНЗИСТОРОВ**

Р.А. Дашкин, П.О. Черняков, ^{}Г.И. Зебрев*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: gizebrev@mephi.ru

**SIMULATION OF THRESHOLD VOLTAGE MISMATCH DUE TO
STOCHASTIC CHARGE IN THE OXIDES OF NANOSCALE MOSFETs**

R.A. Dashkin, P.O. Chernyakov, ^{}G.I. Zebrev*

Department of Micro- and Nanoelectronics,
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, e-mail: gizebrev@mephi.ru

As the feature size of microelectronic chips is reducing, the variability of electronic components has become a very significant issue for contemporary microelectronic chips. The major source of static variability is due to the discrete nature of the charged impurities in the devices. For example, the variations in the number and position of the dopant atoms underneath the MOSFET's gates and the charge trapped in the gate oxides make each transistor different, introducing device-to-device statistical spread in device's parameters. Statistical fluctuations have a fundamental nature since they cannot be reduced by technological improvements. This report aimed to simulation of such effects.

По мере уменьшение размеров современных транзисторов, изменчивость параметров их характеристик становится очень важной проблемой для современных интегральных схем с технологической нормой менее 100 нм. Основной причиной разброса параметров является дискретность заряженных примесей в устройствах. В частности, вариативность числа и положения атомов легирующей примеси под каналом МОП-транзистора, а также стохастический заряд, захваченный в подзатворных окислах, делают каждый транзистор функционально неэквивалентным, что приводит к ухудшению функциональных характеристик на уровне интегральной схемы (системы). Стохастическая вариативность такого плана носит фундаментальный характер, поскольку она не может быть уменьшена за счет каких-либо технологических усовершенствований. Внешние неравновесные факторы (ионизирующее облучение, горячие носители, и др.) могут приводить к появлению дополнительной неопределенности в параметрах, связанной с накоплением случайного заряда в окисле [1].

В частности, этот доклад посвящен аналитическому моделированию таких эффектов. Дисперсия токов стока, обусловленная разбросом пороговых напряжений транзисторов, рассчитывалась по формуле

$$\text{var } I_D(V_G) = \int I_D^2(V_G - u_T) P_{V_T}(u_T) du_T - \left[\int I_D(V_G - u_T) P_{V_T}(u_T) du_T \right]^2.$$

При расчете использовалась модель вольтамперных характеристик МОП транзисторов, описанная в [2]. Один из результатов расчетов представлен на рис. 1.

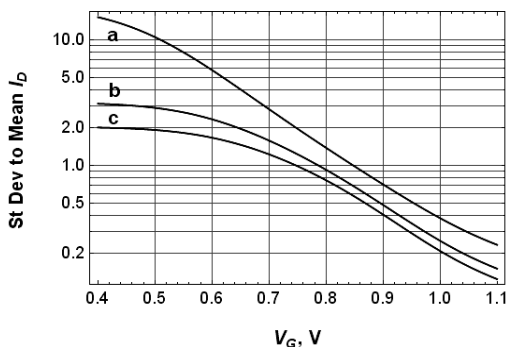


Рис.1. Нормированное на среднее значение стандартное отклонение тока стока МОП транзистора как функция затворного напряжения при трех значениях концентрации заряда в N_{ox} : (a) 10^{13} см^{-2} (b) $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (c) 10^{11} см^{-2} ($t_{ox} = 3 \text{ нм}$, $W/L = 120 \text{ нм} / 60 \text{ нм}$, $V_T = 0.7 \text{ В}$, $N_A = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)

Уменьшение относительной величины разброса тока стока от одного транзистора к другому при увеличении напряжения на затворе объясняется экранированием зарядов в окисле подвижным зарядом канала.

Литература

1. G.I. Zebrev, M.S. Gorbunov, Proceedngs SPIE, **7025**, 702517 (2008).
2. G.I. Zebrev, V.V. Orlov, A.S. Bakerenkov, V.A. Felitsyn, IEEE Trans. Nucl. Sci., **64**(8), 2212-2218 (2017).

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И КРЕМНИЯ
С ПОМОЩЬЮ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ**

**А.Е. Жуков¹, Н.В. Крыжановская¹, М.В. Максимов¹, Э.И. Моисеев¹, Ф.И. Зубов¹,
М.М. Кулагина², С.И. Трошков², Ю.М. Задиранов²*

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН,
Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина 8(3), e-mail: zhukale@gmail.com

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26

**PROSPECTS FOR INTEGRATION OF LASERS WITH SILICON USING
QUANTUM-DOT MICRO-RESONATORS**

**A.E. Zhukov¹, N.V. Kryzhanovskaya¹, M.V. Maximov¹, E.I. Moiseev¹, F.I. Zubov¹,
M.M. Kulagina², S.I. Troshkov², Yu.M. Zadiranov²*

¹St Petersburg National Research Academic University of RAS,
Russia, 194021, St Petersburg, Khlopina 8(3), e-mail: zhukale@gmail.com
²Ioffe Institute of RAS, Russia, 194021, St Petersburg, Politekhnicheskaya 26

Results are presented to demonstrate high performance microdisk laser directly grown onto a silicon substrate. A mA-level threshold current and lasing at elevated temperatures were achieved in a quantum-dot based laser heterostructure (as opposed to a quantum-well counterpart).

Потребность в увеличении скорости передачи данных диктует необходимость использования оптической связи на все более коротких расстояниях – в перспективе в пределах одной интегральной схемы. Это является движущей силой для поиска путей снижения размеров лазерных излучателей и потребляемой ими мощности при одновременном максимальном упрощении технологии их изготовления, а также для интеграции оптически-активных элементов с кремнием. В этом отношении перспективными кандидатами являются микродисковые или микрокольцевые лазеры с активной областью на основе квантовых точек (КТ) In(Ga)As. Размер таких микролазеров может быть уменьшен до $1\div 2$ мкм [1], что не только облегчает интеграцию, но и позволяет уменьшить пороговый ток. Кроме того, длина волны излучения квантовых точек соответствует прозрачности кремния, а направление его распространения (в отличие от вертикально-излучающих лазеров) лежит в плоскости подложки, что позволяет реализовать различные схемы вывода света в латеральном направлении для последующего сопряжения с другими элементами оптической схемы, например, посредством планарных волноводов или через свободное пространство.

Наконец, благодаря глубокой локализации носителей заряда в активной области, КТ-микролазеры характеризуются относительно высокой температурной стабильностью (максимальная температура генерации в непрерывном режиме инжекционных микродисковых лазеров составила 100°C [2]), а кроме того низкой чувствительностью к поверхностной безызлучательной рекомбинации, а также другим каналам безызлучательной рекомбинации, например к дислокациям. Первое обстоятельство позволяет создавать оптические резонаторы КТ-микролазеров с помощью простой технологии глубокого травления сквозь активную область без какой-либо пассивации боковой поверхности, а второе дает возможность достигать приемлемых характеристик в микролазерах, созданных из эпитаксиальных гетероструктур, характеризующихся большой плотностью дефектов, таких как лазерные гетероструктуры, синтезированные непосредственно на подложке кремния.

На рисунке 1 приведена зависимость порогового тока от диаметра для микродисковых лазеров различного типа, которая демонстрирует возможность достижения порогового тока уровня мА за счет использования квантовых точек в активной области (пороговая плотность тока менее 1 кА/см^2 в непрерывном режиме генерации без принудительного охлаждения). При этом пороговые характеристики КТ-микролазеров фактически не зависят от подложки (GaAs или Si).

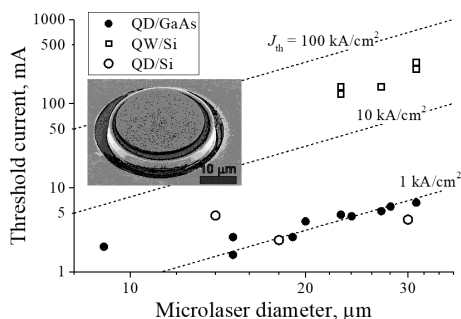


Рис. 1. Пороговая плотность тока (комнатная температура) микродисковых лазеров на основе КТ на подложках GaAs или Si (непрерывный режим), а также на основе квантовых ям на Si (импульсный режим)

КТ микролазеры на Si работали вплоть до 60 и 110°C в непрерывном и импульсном режимах. В то же время в микролазерах на Si на основе квантовой ямы пороговая плотность тока при 300 K выше более чем на порядок, что делает невозможным реализацию непрерывного режима генерации.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ (проект 3.9787.2017/8.9).

Литература

1. M.V. Maximov, *et al*, *Nanoscale Res. Lett.*, **9**(1), 657 (2014).
2. N.V. Kryzhanovskaya, *et al*, *Electron. Lett.*, **51**(17), 1354 (2015).

**РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНОГО МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦАНДЕРА
НА ПЛАТФОРМЕ InP**

**И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, Р.В. Рыжук, М.М. Грехов, С.А. Номоев,
Н.В. Антонова, А.В. Аврамчук, Р.В. Захарченко, С.А. Шостаченко,
М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: ivasilevskii@mail.ru

DEVELOPMENT OF INTEGRATED InP-BASED MACH-ZENDER MODULATOR

**I.S. Vasil'evskii, A.N. Vinichenko, R.V. Ryzhuk, M.M. Grekhov, S.A. Nomoev,
N.V. Antonova, A.V. Avramchuk, R.V. Zaharchenko, S.A. Shostachenko,
M.N. Strikhanov¹, N.I. Kargin*

National Research Nuclear University MEPhI
Russia, 115409, Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: ivasilevskii@mail.ru

Mach-Zender electrooptic modulator formation on InP-based heterostructures is comprehensively studied. The development involves heterostructure layout optimization, epitaxial technique, precise electron beam nanolithography, planar ridge waveguide dry plasma etching, polymer planarization for the upper contact. Critical issues are discussed to reach a complete prototype of MZ-modulator with -3dB frequency as high as 10 GHz.

Электрооптический модулятор является одним из ключевых компонент интегральной микроволновой фотоники (радиофотоники, РФ). Существуют успешные реализации модулятора на основе абсорбционного, рефрактивного и интерферометрического типа. Выбранная в работе реализация модулятора Маха-Цандера на платформе InP-совмещенных гетероструктур InAlGaAsP является приоритетной задачей для отечественных РФ технологий и открывает возможности создания быстродействующих РФ устройств, сочетающих как активные, так и пассивные компоненты, поскольку обладает хорошим частотным диапазоном, компактностью и относительной стабильностью параметров.

В рамках настоящей работы проведен анализ состояния проблемы, разработаны эскизные топологии гетероструктур на основе InAlGaAs/InAlAs сверхрешеток, эскизный технологический маршрут и ключевые технологические операции для создания прототипа модулятора. Такими операциями, отличающих процесс создания модулятора от других родственных процессов формирования АЗВ5 СВЧ приборов, являются прецизионная электронно-лучевая литография (ЭЛЛ), сухое плазмохимическое травление высокоаспектных волноводных структур, содержащих

большое количество InAs, а также планаризация верхнего уровня топологии для формирования контактов к полоску.

Разработана технология выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии активных слоев различного состава – как решеточно-согласованных, так и симметрично рассогласованных сверхрешеток (до 30 периодов), рентгенодифракционным методом продемонстрировано высокое качество сверхрешеток на основе четверного твердого раствора InAlGaAs (рис. 1). Измерения оптических параметров (спектроскопия фотолюминесценции, спектроэллипсометрия) вспомогательных образцов с одиночными слоями, так и структуры в целом, позволяют скорректировать слоевую структуру и оптимизировать параметры эпитаксиальной гетероструктуры.

В выбранных для прототипирования вариантах топологии ширина полоска составляет $1.0 \div 1.8$ мкм, при глубине полоска от 1.2 до 1.6 мкм. При этом требования к точности исполнения отдельных элементов топологии оказываются на уровне ± 20 нм. Кроме того, топологии разветвителя и сумматора на эффектах мультимодальной интерференции были оптимизированы для устранения дозовых эффектов близости при ЭЛЛ (рис. 2). Разработан процесс плазмохимического травления гетероструктур через жесткую маску с удовлетворительной гладкостью стенок при травлении на целевую глубину. Разработаны узлы ввода-вывода оптического излучения на основе планарных дифракционных решеток. Созданный научно-технический задел позволяет провести масштабную верификацию модели и создать действующий прототип устройства в 2018 г.

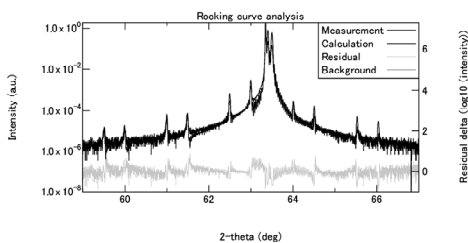


Рис. 1. Рентгеновская дифрактометрия InP гетероструктуры

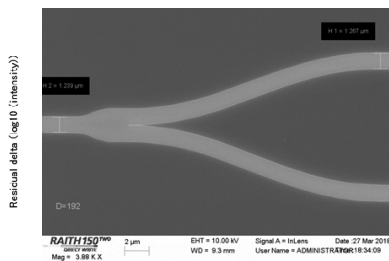


Рис. 2. Топология волноводного разветвителя модулятора М-Ц

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI58117X0026.

СВЧ ФОТОДИОД НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР InAlAs/InGaAs/InP

*К.С. Журавлев¹, *Д.В. Дмитриев¹, А.И. Торопов¹, М.С. Аксенов¹, Н.А. Валишева¹,
А.М. Гилинский¹, И.Б. Чистохин¹, С.А. Малышев², А.Л. Чиж², К.Б. Микитчук²*

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, дом 13, e-mail: ddmitriev@isp.nsc.ru
²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Беларусь, 220072, г. Минск, пр. Независимости, дом 68, e-mail: oelt@oelt.basnet.by

MICROWAVE PHOTODIODES ON THE BASE OF InAlAs/InGaAs/InP HETEROSTRUCTURES

*K.S. Zhuravlev¹, *D.V. Dmitriev¹, A.I. Toropov¹, M.S. Aksenov¹, N.A. Valisheva¹,
A.M. Gilinsky¹, I.B. Chistokhin¹, S.A. Malyshev², A.L. Chizh², K.B. Mikitchuk²*

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
Russia, 630090 Novosibirsk, pr. Lavrentieva, e-mail: ddmitriev@isp.nsc.ru
²SSPA "Optics, optoelectronics and laser technology"
Belarus, 220072, Minsk, av. Nezavisimosti 68, e-mail: oelt@oelt.basnet.by

In work the basic technology of manufacture of the photodiode in the 1.55 μm spectral range with the Schottky barrier were developed. The manufacturing technology includes the following processes: MBE technology, the mesa formation using wet and dry chemical etching, passivation of the diode's surface by dielectric layer, formation of ohmic contacts and the Schottky barrier. The manufactured photodiodes have parameters: the sensitivity of photodiodes is 0.45A/W. Stable work to frequencies about 30 GHz, the reverse bias currents equal $(3\div 5) \cdot 10^{-11}$ A, the ideality factor and the barrier height close to 1.3 and 0.7 eV, respectively.

В рамках создания мощных СВЧ фотодиодов телекоммуникационного диапазона ($\lambda \approx 1.55 \mu\text{m}$) для линий оптоволоконной связи и систем радиофотоники [1, 2] был выбран вариант конструкции фотодиода с барьером Шоттки и меза-структурой на основе гетероэпитаксиальных слоёв (ГЭС) InAlAs/InGaAs на подложке $(001)\text{InP}$ [3, 4]. Для выращивания структур использовалась установка молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Riber Compact-21t.

В работе была разработана технология изготовления мощных СВЧ фотодиодов на основе ГЭС InAlAs/InGaAs/InP , включающая следующие этапы: технология синтеза ГЭС методом МЛЭ и технологические процессы, обеспечивающие изготовление приборных структур мощных СВЧ фотодиодов.

Синтез ГЭС состоит из последовательных этапов: предэпитаксиальная подготовка, вакуумный отжиг подложки $(001)\text{InP}$ в потоке мышьяка (As)

для получения атомарно чистой поверхности, для последующего осаждения эпитаксиальных слоёв. Калибровка источников индия (In), галлия (Ga), алюминия (Al) по потокам для формирования слоёв InAlAs и InGaAs, согласованных по параметру кристаллической решетки с подложкой (001)InP. Отработка и выбор условий выращивания отдельных нелегированных слоёв InAlAs и InGaAs, так как для понижения темновых токов в фотодиоде необходимо понижение концентрации дефектов или неконтролируемых примесей слоях [5]. Калибровка уровня легирования для слоёв $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ и $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. Определение оптимальных условий роста многослойных структур InAlAs/InGaAs/InP и синтез тестовых образцов.

Разработан технологический маршрут изготовления мощных СВЧ фотодиодов на основе полученных структур: жидкостного и сухого травления ГЭС для получения меза-структур, формирования пассивирующих диэлектрических покрытий, создания омических контактов и формирования барьера Шоттки [6]. Изготовлены макеты СВЧ фотодиодов и изучены их статические и динамические параметры. На рисунке 1 представлены вольт-амперные характеристики готовых чипов фотодиодов с барьером Шоттки для диаметра мез 15 мкм и утоненной подложкой до 100 мкм.

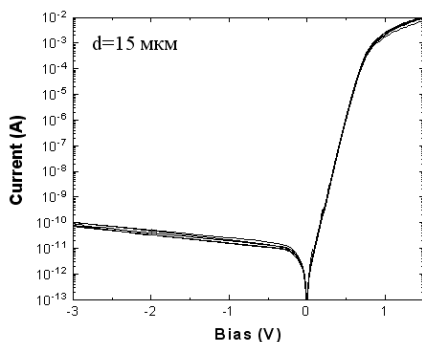


Рис. 1. ВАХ готовых чипов мощных СВЧ фотодиодов

Изготовленные фотодиоды характеризуются значениями темнового тока $3 \cdot 10^{-11}$ А при обратном напряжении -2 В. Коэффициент идеальности прямой ветви вольт-амперной характеристики составляет $n = 1.3$. Высота барьера при нулевом смещении ~ 0.7 эВ. Чувствительность фотодиодов с поглощающим слоем InGaAs 640 нм составляет 0.45 А/Вт. Такие чипы стабильно работают до частот порядка 30 ГГц.

Литература

1. W. Knap et al., *Nanotechnology*, **24**, 214002 (2013).
2. B.R. Nag, *Physics of Quantum Well Devices*. Kluwer Academic Publishers. p. 223 (2002).
3. И.Б. Чистохин, К.С. Журавлев, УПФ, **3**(1), 92-100 (2015).
4. L.J.J. Tan et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **46**, 1153 (2010).
5. K. Zhao, S. You, J. Cheng and Y. Lo, *Appl. Phys. Lett.*, **93** (15), 153504 (2008).
6. I.B. Chistokhin et al., *Materials Science in Semiconductor Processing* **74**, p. 193–198 (2018).

**ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИЕ ЛАЗЕРЫ,
СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ СПЕКАНИЯ**

****К.О. Воропаев^{1,2}, Б.И. Селезнев¹, А.С. Ионов², А.В. Петров²***

¹Новгородский Государственный университет имени Ярослава Мудрого
Россия, 173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, дом 41,
e-mail: Kirill.Voropaev@novsu.ru

²ОАО "ОКБ-Планета"

Россия, 173004, г. Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, дом 2/13.

WAVER-FUSED VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITTING LASER

****K.O. Voropaev^{1,2}, B.I. Seleznev¹, A.S. Ionov², A.V. Petrov²***

¹Yaroslav The wise Novgorod State University
Russia, 173009 V. Novgorod, St. Peterburgskaya 44, e-mail: Kirill.Voropaev@novsu.ru

²OKB-Planeta PLC

Russia, 173004 V. Novgorod, Fedorovski Ruchey 2/13

This paper presents the research of technology waver fused vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL). This multilayer structure includes the following layers: distributed Bragg reflectors of $Ga_{1-x}Al_xAs$, buried tunnel junction, contact layers of InGaAs, active layer of InAlGaAs/InP. Structure based on three wafers: two GaAs, including heterostructure top and bottom Bragg reflectors and InP including quantum wells, contact layers and tunnel junction.

Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) превосходят другие типы диодных лазеров за счет более низкого энергопотребления, симметричной диаграммы направленности и низких производственных издержек [1].

Длинноволновые ВИЛ представляют интерес для систем с оптической связью, волоконных систем и других технологий, связанных с кремниевой фотоникой. Особый интерес представляют ВИЛ диапазона 1550 нм, на данной длине волны потери при распространении излучения в кварцевом волокне в десять раз меньше, нежели на длине волны 850 нм.

В отличие от ВИЛ 850 нм создание ВИЛ 1550 нм имеет ряд сложностей. Ключевой проблемой является отсутствие эффективной излучающей активной области в системе материалов InAlGaAs/GaAs, для данной цели перспективным является использование гетероструктуры на основе InAlGaAs/InP. Но при использовании данной структуры, возникает проблема низкого контраста показателей преломления четвертьволновых слоев InAlGaAs, InAlAs, InGaAsP и InP, входящих в состав распределенных брэгговских отражателей (РБО), в отличие от ВИЛ на основе системы материалов InAlGaAs/GaAs. В результате для достижения требуемого

коэффициента отражения необходимо использовать большое количество слоев. В свою очередь из-за низкой теплопроводности РБО на основе InP, по сравнению с РБО на основе GaAs, происходит быстрый разогрев активной области ВИЛ, сформированных на основе систем InAlGaAs/InP.

Для решения описанных проблем была предложена конструкция (рис. 1) ВИЛ, совмещающего в себе излучающую область на основе твердых растворов, выращенных на подложке InP и высокоэффективные брэгговские отражатели на основе AlGaAs/GaAs. Формирование исходной структуры для ВИЛ осуществляется посредством спекания пластины, содержащей в себе гетерозпитаксиальную структуру активной излучающей области и двух пластин, содержащих гетерозпитаксиальные структуры верхнего и нижнего брэгговских отражателей [2]. Апертуру лазера формирует зарощенный туннельный переход.

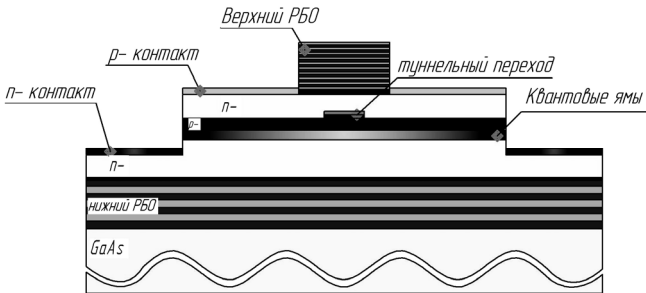


Рис. 1 – конструкция ВИЛ, сформированного методом спекания

В данной работе рассмотрены особенности технологии формирования кристаллов ВИЛ с длиной волны генерируемого излучения 1550 нм, формируемых при помощи метода спекания, и проведен анализ отдельных технологических этапов.

Литература

1. N. Volet, V. Iakovlev, A. Sirbu, A. Caliman, G. Suruceanu, A. Mereuta and E. Kapon, Proc. of SPIE, vol. 8432 (2012).
2. A. Sirbu, V. Iakovlev, A. Mereuta, A. Caliman, G. Suruceanu, E. Kapon, Semicond. Sci. and Tech., 26, 014016 (2011).

**ПРИБОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaN
С ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫМИ СЛОЯМИ**

**Д.Г. Федоров¹, Б.И. Селезнев²*

¹ОАО «ОКБ-Планета»

Россия, 173004, г. Великий Новгород, Федоровский ручей, д. 2/13

²Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Россия, 173003 ул. Б. Санкт-Петербургская, д. 41, e-mail: FedorovDG@mail.ru

INSTRUMENT STRUCTURES BASED ON GAN WITH ION-DOPED LAYERS

**D.G. Fedorov¹, B. I. Seleznev²*

¹ОАО «ОКБ-Planeta»

Russia, 173004, Veliky Novgorod, Fedorovsky rychey 2/13

²Novgorod State University

Russia, 173003, Veliky Novgorod, B. Sankt-Peterburgskaya 41, e-mail: FedorovDG@mail.ru

The creation in the nitride of gallium of n^+ – and p-layers by the implantation of silicon and magnesium ions is considered. Ion implantation of Si^+ and Mg^+ with energy of 50 keV was carried out in epitaxial high-resistance undoped GaN layers. The implantation doses were $1 \cdot 10^{15}$ and $5 \cdot 10^{15}$ cm^{-2} , respectively. To activate the embedded impurity after implantation, GaN structures were subjected to high-temperature photon annealing in a nitrogen medium using low-temperature SiO_2 protective coatings. The annealing modes are established. The profile of implanted impurities was investigated by the SIMS method.

В данной работе рассмотрены технологические особенности формирования диодных структур на GaN с применением технологии ионной имплантации.

Ионная имплантация имеет ряд достоинств, таких как: отсутствие предельной растворимости в материале подложки, формирование локальных сильнолегированных областей и другие. Преимущества ионной имплантации делают ее привлекательным инструментом при формировании микроприборов на основе нитрида галлия.

Имплантация Si^+ в GaN с энергиями ~ 50 кэВ позволяет создавать приповерхностные n^+ – области, на которых возможно формирование омических контактов с малым поверхностным сопротивлением.

Магний является акцептором для GaN. Ионная имплантация Mg^+ в GaN имеет различные применения при формировании приборов на GaN. Так, например, в [1] имплантация Mg^+ в GaN применялась для формирования инвертированной p-GaN области при создании диода на p-n перехо-

де. Внедрение Mg^+ в GaN нашло применение для формирования охранных колец структур диодов Шоттки для повышения пробивного напряжения. В работе [2] показано, что использование охранных колец, сформированных методом ионной имплантации Mg^+ , более чем на порядок снижает токи утечки структур диодов Шоттки на GaN.

Ионная имплантация Si^+ и Mg^+ проводилась в эпитаксиальные высокоомные нелегированные слои GaN с энергией 50 кэВ. Дозы имплантации составляли $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, соответственно. Для минимизации эффекта каналирования образцы GaN располагались под углом 7° к падающему пучку.

Для активации внедренных примесей использовался фотонный отжиг. Отжиг проводился при температуре от 1000°C до 1300°C в течение 1 минуты. В качестве защитных покрытий при отжиге использовались пленки SiO_2 толщиной 400 нм, полученные плазмохимическим методом. При температуре отжига свыше 1200°C на поверхности полупроводника происходило образование дефектов [3].

При ионном легировании образцов GaN магнием измерения электрофизических параметров холловским методом свидетельствуют о дырочной электропроводности. Измеренные концентрация и подвижность составляют $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для образца, отожженного при температуре 1250°C и $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $15 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для образца, отожженного при температуре 1300°C .

Широкие возможности применения ионной имплантации для формирования приборов на основе GaN делают ионное легирование перспективным инструментом в технологии создания приборов на GaN. Получены ионно-легированные слои GaN с n^+ - и p -типом проводимости. Эти результаты могут быть использованы в технологии формирования приборных структур на GaN для повышения пробивных напряжений и уменьшения сопротивления омических контактов.

Литература

1. К. Nomoto, K. Takahashi, T. Oikawa, H. Ogawa, ECS Transactions, **69**(11), 105-112 (2015).
2. T.G. Zhu, U. Chowdhury, M.M. Wong, J.C. Denyszyn, J. of ELECTRONIC MAT., **31**(5) (2002).
3. Б.И. Селезнев, Г.Я. Москалев, Д.Г. Федоров, ФТП, **50**(6), 848-853 (2016).

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОВОДЯЩЕГО САР-СЛОЯ GaN ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ**

**А.В. Желаннов¹, Б.И. Селезнев²*

¹ОАО «ОКБ-Планета»

Россия, 173004, г. Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, 2/13,
e-mail: ZhelannovAV@okbplaneta.ru

²Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,
Россия, 173003, г. Великий Новгород, Б. С.-Петербургская, 41

**APPLICATION OF THE CONDUCTIVE CAP-LAYER GaN IN FORMATION
OF TRANSISTOR STRUCTURES ON NITRIDE OF GALLIUM**

**A.V. Zhelannov¹, B.I. Seleznev²*

¹JSC «OCB – Planet», Russia, 173004, Velikiy Novgorod ul. Fedorovskiy ruchey, 2/13,
e-mail: ZhelannovAV@okbplaneta.ru

²Novgorod State University,
Russia, 173003, Velikiy Novgorod. ul. Bolshaya St. Petersburgskaya, 41

The paper presents data on the study of transistor structures using a conducting GaN cap layer. The annealed ohmic contacts based on the Ti/Al/Ni/Au system show a resistance of 0.8 Ohm·mm. The removal of the n⁺-GaN layer was carried out using selective etching technology. As a result, transistor structures were obtained with the following characteristics: a maximum drain current of 250 mA/mm, a cutoff voltage of -2.8 V, a maximum transconductance of 115 mS/mm.

Высокоэффективные транзисторы на нитриде галлия успешно применяются в СВЧ силовых устройствах и схемах, благодаря уникальному сочетанию свойств полупроводникового материала, а именно широкой запрещенной зоны, высокому напряжению электрического пробоя и высокой скорости насыщения.

При разработке приборных структур, правильный выбор параметров исходного материала во многом определяет достижение предельных характеристик готового устройства. Для получения предельных характеристик транзисторных структур на основе AlGaIn/GaN важным является использование защитных (т.н. сар) слоев, в роли которых могут выступать как тонкие диэлектрические пленки (SiN, SiO₂, Al₂O₃), так и тонкие полупроводниковые слои нитрида галлия (легированные или нелегированные). Использование легированного сар-слоя позволяет улучшать характеристики приборных структур за счет уменьшения контактного сопротивления

ния, но в тоже время требует дополнительной технологической операции по удалению такого слоя.

В работе представлены результаты исследований по применению проводящих сар-слоев GaN при формировании транзисторных структур на основе гетероструктур AlGaIn/GaN.

В качестве исходного материала использовалась гетероэпитаксиальная структура следующего вида: n^+ -GaN толщиной 40 нм, n -Al_{0.24}Ga_{0.76}N толщиной 24.0 нм, AlN толщиной 1.0 нм и буферный слой GaN. Структура выращивалась на подложках сапфира методом MOCVD.

Изготовление транзисторных структур начиналось с формирования меза-изоляции путем травления в хлорсодержащей среде Cl₂/BCl₃/Ar по режиму определенному в [1]. В качестве омических контактов использовалась система металлизации Ti/Al/Ni/Au с последующим отжигом при температуре 820 °С в течении 30 секунд в атмосфере азота. В результате получены контакты с контактным сопротивлением на уровне 0.8 Ом·мм. Перед формированием барьерной металлизации, необходимо провести удаление проводящего сар слоя GaN. Для проведения этой операции, было разработано селективное травление, позволяющее останавливать процесс травления по достижению слоя AlGaIn [2]. Травление проводилось в смеси Cl₂/Ar/O₂ с селективностью травления GaN/AlGaIn порядка 30:1. После удаления n^+ -GaN слоя проводилось формирование барьерной металлизации. Затворы транзисторных структур длиной 0.5 мкм и шириной 100 мкм изготавливались путем последовательного выполнения электронной литографии и электронно-лучевого напыления системы Ni/Au.

В результате проведенного технологического процесса были получены макетные образцы транзисторных структур со следующими характеристиками: максимальный ток стока 250 мА/мм, напряжение отсечки - 2.8В, крутизна порядка 115 мСм/мм.

Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания, проект №3.3572.2017/ПЧ.

Литература

1. А.В. Желаннов, Д.Г. Федоров, Б.И. Селезнев, Сборник трудов 7-й научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», Москва: с. 57-58 (2016).
2. А.В. Желаннов, А.К. Оказов, Б.И. Селезнев, Материалы XV научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», Москва-Дубна: с. 125-127 (2017).

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА СВОЙСТВА НЕСПЛАВНЫХ
ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К НИТРИДНЫМ ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ**

**В.Ю. Павлов, А.Ю. Павлов, Д.Н. Славовский*

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, e-mail: vl-pavlov@mail.ru

**INFLUENCE OF THERMAL PROCESSES ON THE PROPERTIES OF NONALLOYED
OHMIC CONTACTS TO NITRIDE HETEROSTRUCTURES**

**V.Yu. Pavlov, A.Yu. Pavlov, D.N. Slapovskiy*

Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105, Moscow, Nagornij proezd 7, e-mail: vl-pavlov@mail.ru

In this work, different compositions of nonalloyed ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures were studied. Mainly, a study of specific contact resistance changing depends on different temperatures of thermal treatment up to 600 °C in an inert nitrogen ambient was conducted. It is shown that the introduction of a barrier layer of palladium makes it possible to maintain the value of resistance of ohmic contacts without changes at high temperatures. The use of Cr/Pd/Au nonalloyed ohmic contacts is possible without changes of properties up to 400 °C, which is the maximum used temperature of the technological cycle for the nitride devices manufacturing.

Развитие спутниковой связи, телевизионного вещания и широкополосного беспроводного интернета требуют приборов, работающих стабильно на больших частотах с более высокой мощностью [1]. Поэтому идет активное внедрение технологии нитрида галлия в сверхвысокочастотную (СВЧ) промышленность, как военную, так и коммерческую. При росте рабочего частотного диапазона СВЧ устройств идет замена традиционных сплавных омических контактов на несплавленные [2]. Использование несплавленных омических контактов к нитридным гетероструктурам требует дополнительных исследований для оценки изменения их характеристик от внешних факторов, таких как температура. В процессе изготовления приборов и их работы контакт металл-полупроводник греется и может менять свои свойства. В качестве контактной металлизации без термической обработки в несплавленных методах используют композиции Ti/Au и Cr/Au. Для предотвращения миграции золота (Au) через контактный слой Ti(Cr) в полупроводник, происходящей при нагреве, в состав омического контакта вводят слой платины (Pt) или палладия (Pd)[3].

Для оценки влияния тепловых процессов на удельное контактное сопротивление несплавные омические контакты к гетероструктуре AlGaIn/GaN с доращиванием сильнолегированного GaN были исследованы следующие составы металлизации: Ti/Pd/Au, Cr/Au и Cr/Pd/Au.

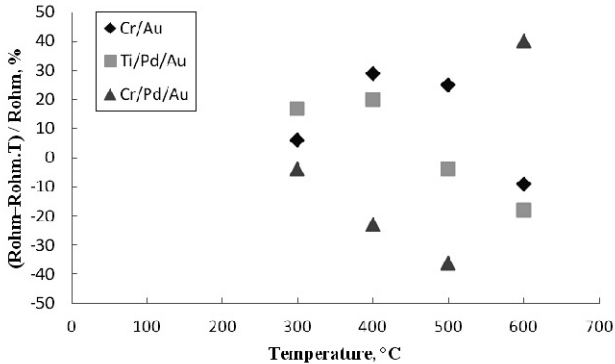


Рис. 1. Зависимость изменения удельного контактного сопротивления ($R_{ohm,T}$), измеренного после нагрева, относительно первоначального (R_{ohm}) от температуры

Исследуемые образцы подвергались одновременному нагреву в установке быстрого термического отжига STE RTA79 от 300 °C до 600 °C с шагом 100 °C в течение 15 минут в инертной среде азота. До и после теплового воздействия на каждом образце оценивалось удельное контактное сопротивление для определения его изменения относительно первоначального значения. Результаты представлены в виде зависимости на рисунке 1. На зависимостях видно, что значения удельных контактных сопротивлений омических контактов с составами металлизации Cr/Au и Ti/Pd/Au при нагреве до 400 °C увеличиваются на 20÷30% относительно измеренного сопротивления при комнатной температуре, а омических контактов с составом Cr/Pd/Au не изменяются, а даже улучшается при 400 °C. Но при нагреве выше 400 °C, мы наблюдаем обратную картину: значения сопротивления для металлизаций всех составов уменьшаются.

Литература

1. U.K. Mishra, L. Shen, T.E. Kazior, Y.F. Wu, IEEE Proceedings, 96(2), 287-305 (2008).
2. А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, С.С. Арутюнян, Ю.В. Федоров, П.П. Мальцев, Микроэлектроника, 46(5), 340-347 (2017).
3. А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, Письма в ЖТФ, 43(22), 96-103 (2017).

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЛАВНЫХ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА ОСНОВЕ Si/Al
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ
НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ AlGaN/GaN**

**Д.Н. Славовский¹, А.Ю. Павлов¹, В.Ю. Павлов¹, А.В. Клековкин^{1,2}, К.Н. Томош¹*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, Нагорный проезд, д. 7, 117105, Москва, e-mail: dslapovskiy@gmail.com

²Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Ленинский проспект, д. 53, 119991, Москва

**THE USE OF Si/Al-BASED ALLOYED OHMIC CONTACTS IN FIELD-EFFECT
TRANSISTORS MANUFACTURING ON AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURES**

**D.N. Slapovskiy¹, A.Yu. Pavlov¹, V.Yu. Pavlov¹, A.V. Klekovkin^{1,2}, K.N. Tomosh¹*

¹Institute of ultrahigh frequency semiconductor electronics of Russian academy of sciences, Nagorniy Proezd, 7, 117105, Moscow, e-mail: dslapovskiy@gmail.com

²P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskiy Prospekt 53, 119991, Moscow

One of the essential elements of the nowadays monolithic integrated circuit is a HEMT field effect transistor which includes ohmic contacts. The ohmic contacts of this transistor should have a minimum value of contact resistance, high thermal stability and smooth morphology. Using of alloyed ohmic contacts based on Si/Al to AlGaN/GaN heterostructures made it possible to reduce the annealing temperature to 675÷700 °C, which led to an improvement in the morphology of alloyed ohmic contacts in comparison with traditional ones, and allowed to expand the 'processing window', making the process more. The implementation into manufacturing of the developed alloyed ohmic contact composition to nitride structures with a controlled heat treatment process by substituting traditional Ti/Al alloyed ohmic contacts will increase the yield of valid devices.

В настоящий момент нитридные гетеросистемы AlGaN/GaN являются чрезвычайно перспективными для создания мощных СВЧ-приборов на их основе благодаря большому ряду преимуществ. Одним из неотъемлемых элементов современной монолитной интегральной схемы является HEMT полевой транзистор, составной частью которого является омический контакт. Омические контакты полевого транзистора должны обладать минимальным значением контактного сопротивления, высокой термостабильностью и гладкой морфологией. Технологический этап формирования омических контактов полевого транзистора должен обладать высокой

степенью воспроизводимости, что, в свою очередь, предъявляет определенные требования к режиму термообработки сплавных омических контактов. Использование сплавных омических контактов на основе Si/Al [1] к гетероструктурам AlGaIn/GaN позволило снизить температуру отжига до $675\div 700$ °С, что привело к улучшению морфологии сплавных омических контактов по сравнению с традиционными. Более того, это позволило расширить диапазон рабочих температур сплавления, сделав процесс более воспроизводимым и менее ограниченным жесткими временными и температурными рамками. К примеру, для традиционной композиции на основе Ti/Al отклонения от оптимальной температуры сплавления на 50 °С приведут к увеличению значения удельного контактного сопротивления примерно в 1.5÷2 раза (рисунок 1). Зависимость удельного контактного сопротивления омического контакта на основе Si/Al, в свою очередь, демонстрирует незначительное увеличение сопротивления в более широком диапазоне температур (рисунок 2).

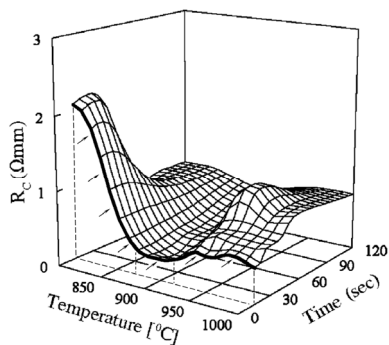


Рис. 1. Зависимость удельного контактного сопротивления омического контакта на основе Ti/Al от времени и температуры сплавления [2]

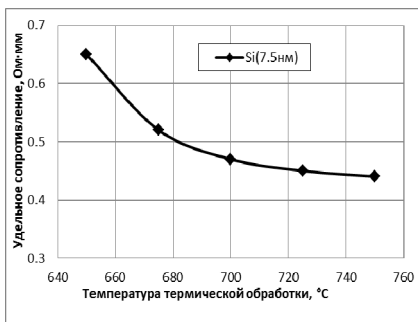


Рис. 2. Зависимость удельного контактного сопротивления омического контакта на основе Si/Al от температуры сплавления

Внедрение в производство разработанной композиции сплавного омического контакта к нитридным структурам с контролируемым процессом сплавления за счет замены традиционных сплавных омических контактов на основе Ti/Al должно позволить увеличить процент выхода годных приборов.

Литература

1. Д.Н. Слаповский и др., ФТП, **51**(4), 461-466 (2017).
2. B. Jacobs, et al., J. of Cryst. Growth, **241**, 15-18 (2002).

**C-V-ХАРАКТЕРИСТИКИ И ГЛУБОКИЕ УРОВНИ В AlGaIn/GaN
HEMT-ТРАНЗИСТОРАХ**

**К.Л. Енишерлова, Ю.В. Колковский, Е.А. Боброва, Э.М. Темпер, С.А. Капилин*
АО «НПП «Пульсар»

105187 Москва, Окружной проезд 27, e-mail: enisherlova@pulsampp.ru

C-V-CHARACTERISTICS AND DEEP LEVELS IN AlGaIn/GaN HEMT TRANSISTORS

**K.L. Enisherlova, Yu.V. Kolkovsky, E.A. Bobrova, E.M. Temper, S.A. Kapilin*
JSC "S&PE" Pulsar"

Okružnoi proezd, 27, 105187, Moscow; e-mail: enisherlova@pulsampp.ru

The features of the C-V characteristics of the gate-drain regions of the AlGaIn/GaN HEMT and test Schottky barriers manufactured by a single technological cycle, so their connection with defects forming deep levels were analyzed. It is shown that the presence of two sections with different slopes of C-V curves is associated with defects with deep levels that are activated as a result of the action of strong electric fields on the edge of the gate.

Цель работы: анализ C-V-характеристик областей затвор-сток AlGaIn/GaN/SiC HEMT и тестовых БШ с учетом их конструктивных особенностей и наличие ловушечных состояний, влияющих на релаксацию емкости при воздействии температур. Исследовались мощные СВЧ HEMT с длиной периферией затвора, с $L_g = 0.25 \div 0.4$ мкм, с разным количеством пальцев затвора, с планарным расположением контактных окон к рабочим областям. Гетероструктуры HEMT имели: слой GaN ($2 \div 3$ мкм), слой AlGaIn ($16 \div 20$ нм) и спейсер – $2 \div 2.5$ нм. Тестовые диоды Шоттки изготавливались в едином технологическом процессе с HEMT. C-V-характеристики «затвор-сток» снимались при $U_{си} = 0$ В. По C-V-измерениям строились профили распределения заряда по глубине. Методом DLTS проводилось обнаружение дефектов, формирующих ГУ.

У всех HEMT структур на C-V кривых при переходе от обогащения к обеднению выявлено наличие ступеньки с изменением угла наклона кривой к оси «X», при этом точка перегиба C-V-кривых у разных транзисторов соответствовала разным по величине $U_{смещ.}$ (рис. 1б). У ряда HEMT нагрев до $T = 473$ К приводил к изменению вида кривой, так что углы наклона участков выше и ниже ступеньки становились близки друг к другу, при этом максимальное изменение формы кривой происходило на нижнем участке. У тестовых БШ не выявлено каких-либо изломов на C-V-кривых, снятых при тех же частотах, что и HEMT (рис. 1а). При исследовании методами DLTS у одного типа HEMT наблюдались электронно-подобные ловушки с $E_a = 0.59 \div 0.6$ эВ и сечением захвата около $1 \cdot 10^{-14}$ см². Перезарядка ловушек наблюдалась при режиме измерения с

отрицательным обратным смещением и отрицательным импульсом инжекции. При этом захват электронов на ловушки во время импульса может происходить в результате туннелирования через барьерный слой. Аналогичные дефекты наблюдались у тестовых БШ и у другого типа НЕМТ, однако, у НЕМТ этого типа наблюдался дополнительный пик, связанный с другой ловушкой. Кроме того, при большом отрицательном импульсе напряжения наблюдалась также глубокая дырочная ловушка. Разные картины дефектов, выявленные DLTS, по-видимому, определяются конструкторско-технологическими особенностями приборов. При отрицательном смещении и подаче положительного импульса инжекции наблюдался центр дырочного типа с аномальным поведением.

Появление характерных перегибов на C-V кривых НЕМТ в отличие от результатов на тестовых БШ связано с краевыми эффектами. Из-за малых размеров и формы затвора НЕМТ-структур, на краях затвора возникают сильные электрические поля (рис. 1в). При высоком обратном смещении из-за наличия сильного электрического поля может иметь место перезарядка ГУ дефектов, расположенных в зоне действия поля. Эти дефекты могут быть как на границах слоев, так в AlGaIn- и GaN-слоях, в частности, под затвором может быть более высокая плотность дефектов, например, из-за влияния «обратного» пьезоэффекта в процессе импульсного воздействия. В сильном обеднении может происходить захват туннелированных электронов на ГУ. В случае тестовых диодов Шоттки из-за несоизмерности размеров БШ и затвора НЕМТ при одинаковых величинах напряжений не возникает сильных электрических полей и скорее всего, не происходит активизация ловушечных состояний.

Итак, экспериментально показано, что наличие 2-ступеней на C-V-кривых областей затвор-сток НЕМТ связано с наличием ГУ в активных областях НЕМТ, которые при сильном обеднении активируются из-за действия сильных электрических полей на краях затвора.

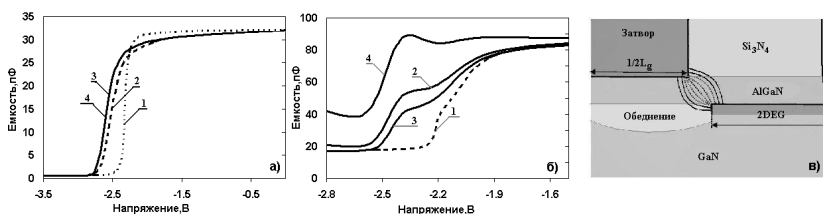


Рис. 1 а, б) C-V-характеристики при $f=100$ кГц и $T: 77$ К, 293 К, 373 К, 473 К, а) тестового БШ; б) области затвор-сток 60-пальцевого НЕМТ; в) схематическое изображение распределения электрических полей на краю затвора НЕМТ по направлению к стоку

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ПРОЦЕССА ТРАВЛЕНИЯ AlGaN
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОДЗАТВОРНОГО ЗАГЛУБЛЕНИЯ ПОЛЕВОГО
ТРАНЗИСТОРА НА AlGaN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ**

**А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, К.Н. Томош, А.В. Клековкин, Ю.В. Федоров*

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, e-mail: alexup@bk.ru

**THE LOW ENERGY ETCHING PROCESS AlGaN OF THE FORMATION RECESS
HEMT AlGaN/GaN**

**A.Yu. Pavlov, V.Yu. Pavlov, K.N. Tomosh, A.V. Klekovkin, Yu.V. Fedorov*

Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105, Moscow, Nagornij proezd 7, e-mail: alexup@bk.ru

For manufacturing of a normally closed field-effect transistor based on the AlGaN/GaN heterostructures, it is proposed to form a gate recess by a low-energy plasma-chemical etching of the AlGaN barrier layer in a high-density plasma with an inductively coupled plasma source. Etching is due to cyclic oxidation of the barrier layer with subsequent chemical removal of the oxidized layer in the chlorine-containing environment. The proposed method allows to controllably etching of the AlGaN layers with a rate of 1.5 nm / cycle without defect formation. Reducing the thickness of the barrier layer of the heterostructure due to dry etching and the gate metallization ensures the operation of the transistor in the enhancement mode.

Нитридные гетероструктуры имеют высокий потенциал для силовой и сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники в силу большой ширины запрещенной зоны и высокой пиковой и насыщенной скорости электронов в электрическом поле [1]. В последние годы в России иницируются работы по созданию нормально закрытых транзисторов на нитридных гетероструктурах, работающих в режиме обогащения (enhancement mode НЕМТ). Такие транзисторы могут быть использованы в цифровой и силовой электронике. Группой Журавлева были получены нормально закрытые транзисторы за счет реализации конструкции нитридной гетероструктуры, обеспечившей необходимую близость канала транзистора к затвору [1, 2]. В Томске для получения нормально закрытых GaN-транзисторов использовалась подзатворная область на основе p-GaN слоя [3]. В нашей работе предлагается использовать низкоэнергетичный процесс травления барьерного слоя AlGaN нитридной гетероструктуры для подзатворного заглабления при формировании полевого транзистора, обеспе-

чивающий приближение затвора к каналу структуру. Схематически конструкция такого полевого транзистора показана на рис. 1.

Процесс травление слоя AlGaN заключается в циклическом удалении окисленного слоя полупроводника, для реализации которого необходимо последовательно окислять слой и затем химически его удалять.

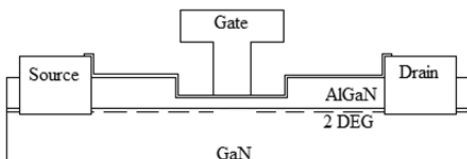


Рис. 1. Схема полевого транзистора на AlGaN/GaN с подзатворным заглиблением

Для разработки низкоэнергетического процесса травления барьерного слоя AlGaN в ИСВЧПЭ РАН использовалась установка с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП). Одно из главных преимуществ

использования ИСП – это травление низкоэнергетичными ионами большой плотности, что обеспечивает режимы бездефектного травления. При этом использовался один реактор для операций окисления и химического травления окисленного слоя, что позволило автоматизировать процесс за счет использования программного обеспечения установки. Окисление проводилось в чистом кислороде при мощности источника ИСП 600 Вт. Удаление окисленного слоя проводилось в хлорсодержащей среде при мощности источника ИСП 100 Вт. За один цикл такого травления «окисление-снятие окисленного слоя» происходит уменьшении толщины барьерного слоя на 1.5 нм.

Использование данного процесса травления AlGaN дает возможность изготовить нормально закрытый транзистор на гетероструктуре AlGaN/GaN с первоначально толстым барьерным слоем без внесения радиационных дефектов. Не нужно под конкретный нитридный прибор растить структуру, так как толщину барьерного слоя можно скорректировать предложенным методом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-01426 А.

Литература

1. К.С. Журавлев, Т.В. Малин, В.Г. Мансуров и др., Письма в ЖТФ, **42**(14), 72-79 (2016).
2. К.С. Журавлев, Т.В. Малин, В.Г. Мансуров и др., ФТП, **51**(3), 395-402 (2017).
3. Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина и др., ФТП, **51**(9), 1278-1281 (2017).

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР
InAlAs/InGaAs/InP**

****Р.В. Рыжук, А.В. Аврамчук, М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин, Р.В. Захарченко,
А.А. Тимофеев, Ю.А. Порохонько, С.А. Шостаченко***

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: ryzhuk-rom@yandex.ru

PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF InAlAs/InGaAs/InP HETEROSTRUCTURE

****R.V. Ryzhuk, A.V. Avramchuk, M.N. Strikhanov, N.I. Kargin, R.V. Zaharchenko,
A.A. Timofeev, Y.A. Porokhonko, S.A. Shostachenko***

National Research Nuclear University MEPhI
Russia, 115409, Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: ryzhuk-rom@yandex.ru

We are researched the process of plasma-chemical etching of the heteroepitaxial InAlAs/InGaAs/InP heterostructure. On top of heterostructure was deposited the thin film of Ti(15nm)/Au(100nm) and photoresist layer. Plasma-chemical treatment was carried out in a stream of Cl₂(15sccm):Ar (75sccm). After 1 minutes of etching process the properties of the thin film of metal and photoresist layer have been saved. After 4 minutes of etching process the thin film of metal not covered of photoresist layer was destroyed. After the etching time of 6 and 8 minutes, the thin film of metal not covered of photoresist layer and photoresist layer were destroyed. The maximum depth of cross-section of heterostructure was exceeding at 10 μm.

Компоненты и устройства радиофотоники обладают рядом преимуществ перед классическими электронными и радиоэлектронными компонентами в части увеличения пропускной способности каналов связи, повышения их помехозащищенности. Одним из перспективных материалов для формирования радиофотонных систем является фосфид индия (InP) и соединения на его основе. Технологический процесс изготовления InP компонентов связан с необходимостью формирования прецизионных элементов, таких как дифракционные решетки, разветвители, согласующие устройства и т.д., которые возможно изготовить с использованием методов сухого химического травления, в том числе с добавлением инертных газов в различных сочетаниях [1]. При этом важно получать относительно гладкий профиль травления вдоль всей структуры, поскольку шероховатость поверхности и стенок волновода сильно увеличивают потери при распространении волны. Для этого могут использоваться твердые маски на основе различных металлов.

В настоящей работе был проанализирован процесс плазмохимического травления InAlAs/InGaAs/InP гетероструктуры. На поверхность гетероструктуры была нанесена пленка Ti(15нм)/Au(100нм) и далее слой фоторезиста. Пленка фоторезиста была проявлена через шаблон, содержащий равномерно расположенные квадратные окна со стороной 250 мкм. Плазмохимическая обработка производилась в потоке $\text{Cl}_2(15\text{sccm}):\text{Ar}(75\text{sccm})$ в течение 1, 4, 6 и 8 минут. Исследование скорости травления проводилось путем анализа профиля гетероструктуры методом сканирующей электронной микроскопии, контроль наличия металлической пленки осуществлялся путем измерения проводимости соответствующего слоя (рис. 1).

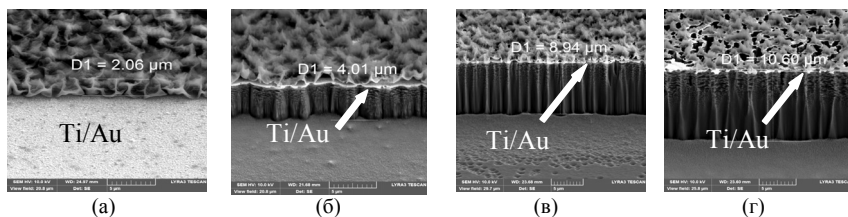


Рис. 1. Профиль InAlAs/InGaAs/InP гетероструктуры после обработки в плазме в течение: 1 минуты (а), 4 минут (б), 6 минут (в) и 8 минут (г)

Показано, что после обработки гетероструктур в течение 1 минуты металлическая пленка еще присутствовала на поверхности образца (рис. 1а). После увеличения времени травления до 4 минут металлическая пленка на поверхности гетероструктуры в местах проявления фоторезиста была удалена. Слой фоторезиста, покрывающий металлическую пленку, оставался непроводящим (рис. 1б). При увеличении времени травления до 6 минут появилась близкая к металлической проводимость по слою, покрытому фоторезистом (рис. 1в). Следовательно, пленка фоторезиста практически разрушилась и ее поверхность состояла из остатков слоя Ti/Au. Дальнейшее увеличение времени травления до 8 минут не привело к существенным изменениям в проводимости слоев (рис. 1г). Глубина травления после обработки в течение 8 минут превысила 10 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI58117X0026.

Литература

1. J.W. Bae et al., J. of the Korean Phys. Society, **50** (2007).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КАРБИДИЗАЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

**А.О. Султанов, А.С. Гусев, М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин, С.М. Рындя,
Г.К. Сафаралиев, Н.В. Сиглова, А.А. Тимофеев*

Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31,
e-mail: karabi86@mail.ru

INVESTIGATION OF POROUS SILICON CARBONIZATION PROCESS

**A.O. Sultanov, A.S. Gusev, M.N. Strikhanov, N.I. Kargin, S.M. Ryndya,
G.K. Safaraliev, N.V. Siglova, A.A. Timofeev*

National Research Nuclear University MEPhI
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: karabi86@mail.ru

In this paper, an experimental and theoretical study of the processes of mesoporous silicon carbonization during the formation of buffer layers for the subsequent epitaxy of 3C-SiC films and related wide-band-gap semiconductors is performed. Experimental samples were obtained by the method of chemical vapor deposition and investigated by scanning electron microscopy. Analytic expressions were obtained for the effective diffusion factor and carbon atoms diffusion length in a porous system. The proposed model takes into account the processes of Knudsen diffusion, coagulation and overgrowing of pores during the formation of a silicon carbide layer.

Возможность релаксации упругих напряжений, вызванных несоответствием параметров кристаллических решеток (~19.72%) и температурных коэффициентов расширения (~8%), позволяет рассматривать пористый кремний, как чрезвычайно привлекательный материал для формирования буферного слоя при гетероэпитаксии SiC на Si [1]. В этой связи исследование карбидизации пористого кремния, как начальной стадии процесса выращивания 3C-SiC из газовой фазы, является актуальной научно-технической задачей. Поэтому основной целью данной работы было математическое описание процесса карбидизации с учетом собственных экспериментальных и литературных данных.

В ходе выполнения работы слои пористого кремния толщиной 2 мкм получили электрохимическим травлением пластин Si (100) диаметром 76 мм в системе $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_3\text{CN}(\text{OH})\text{CH}_3$. Структура пористых слоев и кинетика их формирования описаны нами в работе [2]. Карбидизацию поверхности пластин проводили при температуре подложки 1100 °C и процессном давлении 5 торр. Получен ряд экспериментальных образцов SiC/Si и

SiC/por-Si при вариации времени карбидизации (от 3 до 15 минут). Значения средних радиусов пор и толщин карбидизированных слоев определялись из анализа РЭМ изображений.

Опираясь на выводы авторов работ [3 – 6] и экспериментальные данные, получены выражения для эффективного коэффициента диффузии атомов углерода в мезопористом кремнии $D_{эфф}(t)$ и квадрата толщины карбидизированного слоя $d_c^2(t)$.

$$D_{эфф} = D_{эфф0} + [a_0 R v - \alpha (R r_0 - D_c)] t - R(a_0 \omega + \alpha v) t^2 + \alpha R \omega t^3, \quad (1)$$

где D_c [м²/с] – коэффициент диффузии углерода в SiC; r_0 [нм] и a_0 – среднеарифметический радиус и доля площади открытых пор на поверхности при $t = 0$; $D_{эфф0}$ – эффективный коэффициент диффузии при $t = 0$; R – средняя скорость атомов углерода в порах сложной морфологии; α , ω и v – параметры зарастания и коагуляции пор. Интегрирование уравнения (1) по времени дает выражение d_c^2 .

Вид зависимостей $D_{эфф}(t)$ и $d_c^2(t)$ представлен на рис. 1 а, б соответственно. При выходе из интервала времени $[0; a_0/\alpha]$ начинает действовать модель Дила-Гроува [7].

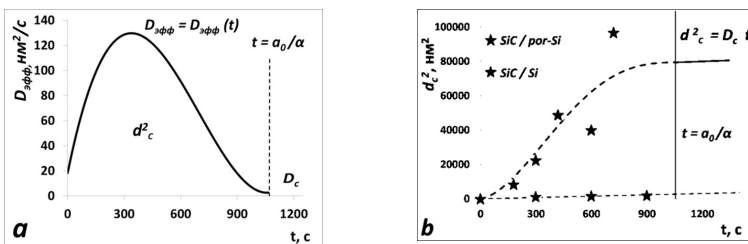


Рис. 1. Зависимости $D_{эфф}(t)$ и $d_c^2(t)$ с учетом процессов коагуляции пор

Предложен новый подход в описании кинетики карбидизации образцов пористого кремния. Получено аналитическое выражение для эффективного коэффициента диффузии в системе 3С-SiC/por-Si.

Литература

1. V. Cimalla et al., J. Phys. D: Appl. Phys., **40**, (2007).
2. N.I. Kargin et al., Russian Microelectronics, **43** (2014).
3. M. Galinsky and U. Senechal, Modelling and Simulation in Engineering (2014).
4. J. Crank, Oxford university press (1975).
5. S.E. Albo et al., AIChE J., **52** (2006).
6. Yu.S. Nagornov, J. of Exp. and Theoret. Phys., **121** (2015).
7. B.E. Deal and A.S. Grove, J. of Appl. Phys., **36** (1965).

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ В МИС НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

**Н.Е. Иванова^{1,2}, Д.Л. Гнатюк¹, Н.В. Щаврук¹*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук
Россия, 142432, г. Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5,
e-mail: natalia.ivanova.mipt@gmail.com

²Московский технологический университет (МИРЭА)
Россия, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78,

METHOD FOR FORMING A GROUNDING PLANE IN A MIS BASED ON NITRIDE OF GALLIUM

**N.E. Ivanova^{1,2}, D.L. Gnatyuk¹, N.V. Shchavruk¹*

¹Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics Russian Academy of Sciences Russia,
142432, Moscow, Nagorny Proezd, 7, p. 5,
e-mail: natalia.ivanova.mipt@gmail.com

²Moscow Technology University
Russia, 119454, Moscow, Prospect Vernadskogo, 78,

The work is devoted to the solution of the problem of creation a ground plane in a microwave system based on GaN. A technological solution for the formation of a ground plane using a photopolymer was proposed.

Перспективы разработки следующего поколения СВЧ техники связаны с прогрессом в развитии СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на основе нитрида галлия [1].

Большинство МИС на GaN проектируют, используя копланарную технологию, т.к. основной технологической трудностью является плазмохимическое травление наиболее широкоприменяемых подложек для GaN [2], в то время как на GaAs, который легко утоняется и хорошо травится, используют как копланарную технологию, так и микрополосок [3, 4].

Для преодоления данных ограничений предложено конструкторско-технологическое решение [5, 6] заключающееся в размещении земляной плоскости не на обратной стороне пластины, а на лицевой, поверх активной части МИС через слой фоточувствительного полимера (рис 1).

Данные полимеры должны обладать следующими свойствами: хорошая адгезия к подложкам и материалам SiC, сапфир, Al /Si, Cr/Si, Au/Si/ Ni/Si/, обладать хорошими планаризирующими свойствами, иметь высокую химическую стойкость к органическим и неорганическим соединениям, температурную стабильность до 350 °С, низкую диэлектрическую прони-



Рис. 1. Поперечное сечение пластины с межэлектрическими соединениями, обеспечивающими общую заземляющую плоскость

заземляющей плоскости без привлечения дополнительного дорогостоящего оборудования.

Согласно исследованиям, достигнуто хорошее соответствие расчетных результатов и результатов измерений, МИС демонстрируют работоспособность в заданном диапазоне [9].

Литература

1. А. Балакирев, А. Туркин, Современная электроника, 4, 28–32 (2015).
2. <https://www.oxford-instruments.com>
3. И.М. Добуш, А.А. Коколов, Л.И. Бабак, «Исследование копланарных элементов монолитных интегральных схем», Доклады ТУСУРа, 2(22), часть 1 (2010).
4. Iulian Rosu, YOЗDAC / VA3IUJ, «Microstrip, Stripline, and CPW Design», <http://www.qsl.net/va3iul>
5. С.А. Гамкрелидзе, П.П. Мальцев, Ю.В. Федоров, Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА, 22(6), 582-588 (2017).
6. Ю.В. Федоров, А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, С.С. Арутюнян, Н.Е. Иванова, К.Н. Томош, А.О. Михалев, «Разработка базовой технологии создания монолитных интегральных схем УМ и МШУ на нитридных наногетероструктурах для ППМ», «Интерматик 2015», часть 4, стр. 240-243 (2015).
7. Т.С. Петрова, «Формирование полиимидных межслойных изолирующих слоев ИС на GaAs», Научная сессия ТУСУР – 2004, материалы всероссийской научно-технической конференции 2004, г. Томск (2004).
8. А.С. Бугаев, Е.Н. Енюшкина, С.С. Арутюнян, Н.Е. Иванова, И.А. Глинский, К.Н. Томош, «Разработка технологии формирования общей земли на активной поверхности монолитной интегральной схемы усилителя мощности на нитридных гетероструктурах», Редакционно-издательский отдел МИРЭА, «INTERMATIC – 2016», часть 4, стр. 45-48, (2016).
9. Иванова Н.Е., Крапухин Д.В. «Применение высокотемпературного фотополимера для формирования общей земли на активной поверхности МИС СВЧ на нитридных гетероструктурах», «Интерматик-2017», часть 3, стр. 588-591 (2017).

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МУЛЬТИБАРЬЕРНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ И РЕГИСТРАЦИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ**

*В.А. Гергель¹, *Н.М. Горшкова¹, А.С. Соболев^{1,2}, М.А. Тарасов¹, В.С. Минкин¹,
Р.А. Хабибуллин³, А.Ю. Павлов³*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, корпус 7, e-mail: gorshkovan@bk.ru

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, строение 5

**TECHNOLOGICAL ROUTE OF MANUFACTURING MULTI-BARRIER
HETEROSTRUCTURES FOR GENERATION AND REGISTRATION OF MICROWAVE
RADIATION**

*V.A. Gergel¹, *N.M. Gorshkova¹, A.S. Sobolev^{1,2}, M.A. Tarasov¹, V.S. Minkin¹,
R.A. Khabibullin³, A.Yu. Pavlov³*

¹Institution of Russian academy of sciences Kotelnikov Institute of radio engineering
and Electronics of RAS

Russia, 125009 Moscow, Mokhovaya 11, p. 7, e-mail: gorshkovan@bk.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology

Russia, 141701 Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky pereulok 9

³Institution of Russian academy of sciences Institute of UHF semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorny passage 7, p. 5

In this paper, principally new topologies of distributed active radiating meta-surfaces of the terahertz range are proposed, freely integrable with quasioptical lenses into a single structure. A technological route for manufacturing distributed active radiating meta-surfaces of the terahertz range has been developed.

Несмотря на широкий выбор интегральных микроволновых схем миллиметрового диапазона для телекоммуникационных и радиолокационных приложений, представленных на мировом рынке, потребность в компактных генераторах этого диапазона, которые могут быть интегрированы на одном кристалле GaAs, остается актуальной для отечественной промышленности. В качестве источника терагерцового излучения можно использовать многобарьерные гетероструктуры на основе GaAs/AlGaAs. Мультибарьерные гетероструктуры, на которых основывается исследование, состоят из эпитаксиальных слоев GaAs/AlGaAs, толщиной порядка

50 нм и содержащие $6\div 7$ барьеров. В теоретических работах [1, 2] показано, что отрицательное дифференциальное сопротивление в таких гетероструктурах достигается при плотности тока 100 кА/см^2 . Спроектированы принципиально новые топологии распределенных активных излучающих метаповерхностей терагерцового диапазона, свободно интегрируемых с квазиоптическими линзами в единую конструкцию. Разработан технологический маршрут изготовления распределенных активных излучающих метаповерхностей терагерцового диапазона. Основные операции технологического маршрута: формирование мезы активных элементов (глубина травления до нижнего легированного кремнием GaAs), формирование омических контактов на основе Ni/Ge/Au, нанесение диэлектрического слоя на основе SiO₂ или Si₃N₄ (толщина диэлектрика не менее 0.2 мкм), формирование окон в диэлектрическом слое, нанесение металла на основе Ti/Au (толщина металлизации не менее 0.5 мкм), резка пластины на кристаллы.

Под формированием «мезы» подразумевают создание структуры на полупроводниковой пластине с проводящими и непроводящими слоями с помощью травления поверхности гетероструктуры. Цель данной операции – отделение активных областей, на которых формируются приборы, друг от друга для избегания электрического контакта между приборами. Омический контакт представляет собой переходную область между приведенными в соприкосновение металлом и полупроводником. Омический контакт должен оказывать минимальное сопротивление проходящему току, т.е. иметь минимальное возможное переходное сопротивление. А также омические контакты должны удовлетворять следующим требованиям: высокая проводимость, хорошая адгезия металлов к полупроводнику, тепловая устойчивость, однородность границы контакта, технологичность (формирование контакта доступными методами), устойчивость к электромиграции, высокая коррозионная стойкость, морфология после термообработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-07-00743 а и № 18-07-00785 а.

Литература

1. В.А. Гергель, И.В. Алтухов, А.В. Верховцева, Г.Г. Галиев, Н.М. Горшкова, С.С. Жигальцов, А.П. Зеленый, Э.А. Ильичев, В.С. Минкин, С.К. Папроцкий, М.Н. Якупов, ФТП, **48**(4), 481-486 (2014).
2. В.А. Гергель, И.В. Алтухов, А.В. Верховцева, Г.Б. Галиев, Н.М. Горшкова, А.П. Зеленый, Э.А. Ильичев, В.С. Минкин, С.К. Папроцкий, ЖТФ, **85**(7), 83-86 (2015).

**ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМОРЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В МУЛЬТИБАРЬЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ**

В.А. Гергель¹, *Н.М. Горшкова¹, А.С. Соболев^{1,2}, М.А. Тарасов¹, В.С. Минкин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, корпус 7, e-mail: gorshkovan@bk.ru

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

**THE STUDY OF THE CHARACTERISTICS THERMORELAXATION MULTIBARRIER
PROCESSES IN HETEROSTRUCTURE**

V.A. Gergel¹, *N.M. Gorshkova¹, A.S. Sobolev^{1,2}, M.A. Tarasov¹, V.S. Minkin¹

¹Institution of Russian academy of sciences Kotelnikov

Institute of radio engineering and Electronics of RAS

Russia, 125009 Moscow, Mokhovaya 11, p. 7, e-mail: gorshkovan@bk.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology

Russia, 141701 Moscow region, Dolgoprudny, Institutskiy pereulok 9

Within the framework of the research work, it is proposed to use an instrumental multilayer heterostructure based on GaAs / AlGaAs with tunnel-opaque layers. The novelty of this solution is the use of the specificity of electron drift in doped nanosized superlattices with a finite number of heterobarriers. The undoubted advantage of such structures and the basic materials used are their miniature, increased resistance to radiation dose loads, relative cheapness and the ability to use microelectronic group technologies in their manufacture.

Известные к настоящему времени источники терагерцового излучения отличает высокая стоимость, сложность технологической реализации, недостаточная мощность, а также необходимость охлаждения до низких температур и минимальная рабочая частота 1 ТГц [1]. Объектом исследования выступает приборная многослойная гетероструктура на основе GaAs/AlGaAs с туннельно – непрозрачными слоями. В аналитических исследованиях многослойная гетероструктура продемонстрировала специфику электронного дрейфа в легированных наноразмерных сверхрешетках с конечным числом гетеробарьеров. Структура представляла собой послойное чередование узкозонных и широкозонных слоев (рассчитывались толщины слоев, их число, степень легирования слоев, химический состав) [2–4]. Для данной структуры выявлены специфические нелинейные ВАХ, в которых высокоомный начальный участок, отвечающий

слабому разогреву, переходит в сильноотоковую область через петлю бистабильности.

Положительный эффект в предлагаемых гетероструктурах для генераторов субтерагерцового диапазона частот достигается благодаря реализации в них термоинжекционной неустойчивости, следствием которой является бистабильность или, что тоже самое, S-образность статических вольт-амперных характеристик (ВАХ). Это позволяет в структурах с ограниченным числом гетерослоев наноразмерной толщины ожидать частот генерации $\sim 500\div 1000$ ГГц. В рамках квазигидродинамической модели электронного дрейфа в мультибарьерных гетероструктурах с разновысокими барьерами рассчитываются пространственные распределения электронной температуры и электрического потенциала как функции плотности электронного потока. Выполненные расчеты позволят спроектировать соответствующие тестовые мультибарьерные структуры так, чтобы на каждом из барьеров падающее напряжение не превышало величины порядка одного вольта. Поскольку превышение этой величины на одном барьере критически сказывается на возможности возникновения области отрицательного дифференциального сопротивления необходимой для возбуждения электромагнитных колебаний в области субтерагерцовых частот в соответствующих резонансных микроэлектронных устройствах. Несомненным преимуществом подобных конструкций и используемых базовых материалов являются их миниатюрность, повышенная стойкость к дозовым радиационным нагрузкам, относительная дешевизна и возможность использовать при их изготовлении микроэлектронные групповые технологии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-07-00743 а и № 18-07-00785 а.

Литература

1. C. Sirtori, Nature Photon., 7, 691 (2013).
2. В.А. Гергель и др., Радиотехника и электроника, 57(4), 481-484 (2012).
3. В.А. Гергель и др., ФТП, 48(4), 481-486 (2014).
4. В.А. Гергель и др., ЖТФ, 85(7), 83-86 (2015).

ТРАНСПОРТ И ТГц СТИМУЛИРОВАННЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОСТЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ В ОБЛАСТИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

**А.А. Андронов¹, А.В. Иконников¹, К.В. Маремьянин¹, Ю.Н. Ноздрин¹, В.И. Позднякова¹, А.А. Мармалюк², А.А. Падалица², М.А. Ладугин², В.А. Беляков³, И.В. Ладенков³, А.Г. Фефелов³*

¹ИФМ РАН, Нижний Новгород, 603067, Академическая 8, e-mail: andron@ipmras.ru

²Сигм-Плюс, Москва, 117342, Введенского 3.

³ОАО «Салют», Нижний Новгород, 603950, Ларина 7.

TRANSPORT AND THz STIMULATED EMISSIONS FROM SIMPLE SUPERLATTICE IN POSITIVE DIFFERENTIAL CONDUCTIVITY REGION: RIVAL TO QUANTUM CASCADE LASERS?

**A.A. Andronov¹, A.V. Ikonnikov¹, K.V. Maremyanin¹, Y.N. Nozdrin¹, V.I. Pozdnykova¹, A.A. Marmalyuk², A.A. Padalitsa², M.A. Ladugin², V.A. Belyakov³, I.V. Ladenkov³, A.G. Fefelov³*

¹Inst. for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia; andron@ipmras.ru

²Sigm-Plus, Moscow, Russia, 117342, ul. Vvedenskogo 3.

³«Salut», Nizhny Novgorod, Russia, 603950, Larina str., 7.

Emissions at 2.6÷2.8 THz are observed from liquid helium cooled disk chips with metal – superlattice – metal cavities made of two low n type doped wafers with weak barrier GaAs-GaAlAs superlattice. The emissions are at 8.6÷18.8 V within region of rising chip current that guarantees absence of electric field domains. At 2.6÷2.7 THz the emissions tunable by 8÷10 V are *higher* than the Bloch oscillation frequency; while at 2.8 THz at 12÷18.0 V are *lower* than the frequency. The frequencies of the bands are measured with cyclotron resonance filter; the band width is of about that of the THz quantum cascade laser. We speculate that the emissions are super luminescence (amplification) of whispering gallery modes in the chips as a result of inverted Wannier-Stark level transitions under bias. The results give strong impetus for development of THz and higher frequency sources based on such simple superlattices.

В работе [1] показано, что сверхрешетки (СР), при учете одного уровня в ямах СР, обладают падающим участком на ВАХ (т.е. имеют ОДП) и поэтому «позволяют создать генераторы на любую частоту и блоховский генератор». В работе [2], показано, что ОДП тянется до блоховской частоты, а в работах [3], предложены лазерные схемы в СР при участии нескольких уровней в ямах СР. Препятствием для реализации этих предложений являлось возникновение доменов статического поля, что было преодолено в квантовых каскадных лазерах (ККЛ). В [4] предложен другой

метод преодоления доменов – СР со слабыми барьерами, когда из-за межминизонного туннелирования ток растет с полем, и возможна ОДП на частотах, больше блоховской [5–9].

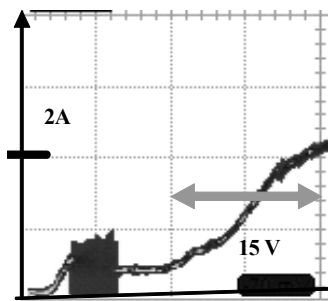


Рис. 1. ВАХ чипа СР из пластины 1755. Область ТГц излучения отмечена стрелкой

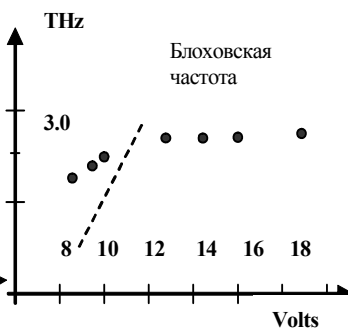


Рис. 2. Частота излучения в зависимости от напряжения на чипе

В докладе приведены результаты исследований ВАХ и спектра излучения из чипов таких СР с помощью фильтра на основе ЦР в структуре КРТ с квантовой ямой, помещаемой в магнитном поле, между чипом и Ge(Ga) детектором при 4К [8] (рис 1, 2). ВАХи и излучения наблюдались на чипах диаметром 0,2, 0,5 и 1 мм, со сверхрешетками GaAs-GaAlAs в 1000 периодов: яма GaAs около 150 Å, барьер GaAlAs с долей алюминия 12% толщиной около 20 Å. Мы считаем, что излучения связаны с возбуждением мод шепчущей галереи в чипе [8–9] в результате инвертированных переходов между уровнями Ванье-Штарка в СР в электрическом поле [5–8]. Оптимизация СР должна привести к источникам ТГц и более высокочастотных излучений на простых СР.

Литература

1. L. Esaki, R. Tsu, IBM Jour. Res. Dev, **14**, 61-65. (1970).
2. S.A. Kútorov et al., Sov. Phys. – Solid State, **13**(8), 1872-1874 (1971).
3. Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, ФТП, **5** (4), 797 (1971); **6** (1), 148 (1972).
4. A.A. Andronov et al., ФТП, **37**(3), 378-383 (2003).
5. A.A. Andronov et al., Quantum Electronics, **40**(5), 400–405 (2010).
6. A.A. Andronov et al., JETP Lett., **102**, 207-211 (2015).
7. D.O. Winge, et al., AIP Advances, **6**, 045025 (2016).
8. A.A. Andronov et al., Semiconductors, **4**, 431-435 (2018).
9. A.A. Andronov et al., Electronics Lett., **52**(5), 383-385 (2016).

**ТУННЕЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ СВЕРХРЕШЕТОК
GaAs/AlAs С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ
ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

*И.В. Алтухов¹, М.С. Казан¹, *С.К. Папроцкий¹, Н.А. Хвальковский¹,
И.С. Васильевский², А.Н. Виниченко²*

¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 125009, Москва, Моховая, 11-7,
e-mail: s.paprotskiy@gmail.com

²НИЯУ «МИФИ», Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31,
e-mail: ivasilevskii@mail.ru

**TUNNELING CONDUCTANCE OF SHORT-PERIOD GaAs/AlAs SUPERLATTICES
WITH ELECTRIC DOMAINS AT ROOM TEMPERATURE**

*I.V. Altukhov¹, M.S. Kagan¹, *S.K. Paprotskiy¹, N.A. Khvalkovskiy¹,
I.S. Vasil'evskii², A.N. Vinichenko²

¹V.A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Ac. Sci.,
11-7, Mokhovaya str., 125009, Moscow, Russia, e-mail: s.paprotskiy@gmail.com

²National Research Nuclear University MEPH, 31, Kashirskoe shosse, 31
115409, Moscow, Russia, e-mail: ivasilevskii@mail.ru

Tunneling current in GaAs/AlAs short-period superlattices (SLs) at the domain formation was studied at room temperature. The current hysteresis observed at sweep-up and sweep-down of the bias was explained by a transition from moving to static domain regime. The series of maxima in the current-voltage characteristics in the range of moving domains is supposed to be the result of optical phonon assisted tunneling through barriers inside the triangular domain. The excitation of ring terahertz cavity by SLs with domains due to their dynamical negative resistance is demonstrated.

Исследовались короткопериодные сверхрешетки (СР), содержавшие 100 периодов 4 нм GaAs/2 нм AlAs, расположенных между сильно легированными ($n = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) верхним контактным слоем n^+ -GaAs и подложкой n^+ -GaAs, при комнатной температуре. Меза-структуры в форме колец диаметром 10÷15 мкм и шириной кольца 0.8÷1.5 мкм с кольцевыми металлическими контактами формировали распределенный ТГц резонатор на длины волн в свободном пространстве от 110 до 160 мкм. К образцам прикладывались треугольные импульсы напряжения с временем нарастания 0.5÷10 нс. Из зависимостей напряжения и тока от времени восстанавливались вольтамперные характеристики (ВАХ) при прямой и обратной развертке напряжения. Измерения проводились при комнатной температуре.

При некотором пороговом напряжении U_c наблюдалось резкое падение тока (до 50%), вызванное образованием движущихся доменов. Домены возникают из-за наличия отрицательной дифференциальной проводимости в некоторой области напряжений при резонансном туннелировании электронов. Оценки величин полей вне и внутри движущегося домена, проведенные по экспериментальным ВАХ, показывают, что механизмы проводимости в областях слабого и сильного поля существенно различны: вне домена проводимость минизонная (резонансное туннелирование Эсаки – Цу), а внутри домена проводимость происходит за счет последовательного нерезонансного туннелирования (sequential tunneling).

При $U > U_c$ на ВАХ обнаруживались: (1) гистерезис при прямой и обратной развертке напряжения и (2) серия максимумов, почти эквидистантных по напряжению (рис. 1). Гистерезис связывается с переходом между режимами с движущимся и статическим доменом. В последнем случае на ВАХ появлялся участок с насыщением тока. Максимумы на ВАХ объясняются туннельными переходами между квантовыми ямами в треугольном домене, сопровождающимися испусканием оптических фононов.

Изменение резонатора приводило к изменению порога образования доменов (рис. 2). Обнаруженное влияние резонатора на резонансное туннелирование в CP GaAs/AlAs указывает на возбуждение ТГц резонатора за счет отрицательного сопротивления CP с доменами.

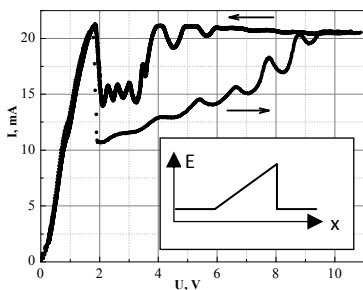


Рис. 1. ВАХ CP GaAs/AlAs при прямой и обратной развертке напряжения.
На вставке – форма домена

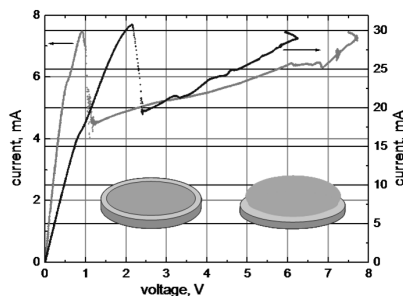


Рис. 2. ВАХ CP GaAs/AlAs до (левая вставка) и после (правая вставка/шкала) изменения резонатора

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 16-29-09626, 16-29-03135) и программ РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий» и «Новые источники миллиметрового и терагерцового излучения и их перспективные приложения».

**ЗАМОРОЖЕННАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И ЭФФЕКТ ААРОНОВА-БОМА
В СТРУКТУРАХ «КВАНТОВЫЕ КОЛЬЦА НА КВАНТОВОЙ ЯМЕ» GaAs/AlGaAs**

**Ю.Д. Сибирмовский, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, Д.А. Сафонов,
М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: sibirmovsky@gmail.com

**PERSISTENT PHOTOCONDUCTIVITY AND AHARONOV-BOHM EFFECT
IN GaAs/AlGaAs “QUANTUM RINGS ON QUANTUM WELL” STRUCTURES**

**Y.D. Sibirmovsky, I.S. Vasil'evskii, A.N. Vinichenko, D.A. Safonov,
M.N. Strikhanov, N.I. Kargin*

National Research Nuclear University «MEPhI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: sibirmovsky@gmail.com

We investigate electron transport properties of heterostructures based on AlGaAs/GaAs/AlGaAs HEMT with an array of GaAs quantum rings added on top of the quantum well. For a very thin QW layer, QRs start to strongly affect the conductivity. Without illumination, Hall concentration is at least an order of magnitude lower than in the reference sample without QRs. Under illumination, both concentration and mobility increase. For $T = 77$ K the ratio of light to dark conductivity is about 250. From magnetoresistance measurements at $T = 4$ K, it is apparent that weak oscillations, periodic in magnetic field, are present, attributed to Aharonov-Bohm effect.

Электронный транспорт в системах с беспорядком представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес. Существуют исследования для гетероструктур с напряженными квантовыми точками [1,2]. Особенностью данной работы является использование решеточно-согласованных квантовых колец GaAs/AlGaAs. Благодаря этому отсутствует вклад в рассеяние носителей заряда, связанный с механическими напряжениями, а также появляется возможность наблюдения эффектов в магнитном поле, вызванных двусвязной геометрией колец, например, эффекта Ааронова-Бома, который ранее успешно наблюдался в системах с антиточками [3].

В предыдущей работе было установлено, что внедрение слоя квантовых колец на поверхность КЯ GaAs/AlGaAs толщиной 10 нм уменьшает подвижность и концентрацию электронов, меняет характер их температурной зависимости и увеличивает фотопроводимость [4]. В данной работе представлены новые результаты для толщины КЯ 6 нм. При комнатной температуре в темноте концентрация электронов на порядок меньше, чем в опорном образце без КК. Под действием ИК или видимого излучения концентрация и подвижность растут, причем при $T = 77$ К освещение

приводит к падению удельного сопротивления в 250 раз. При $T = 4$ К проводимость в темноте полностью замораживается, однако использование ИК светодиода позволяет наблюдать несколько осцилляций Шубникова-де Гааза, а также слабые осцилляции, периодичные в магнитном поле, вызванные эффектом Ааронова-Бома.

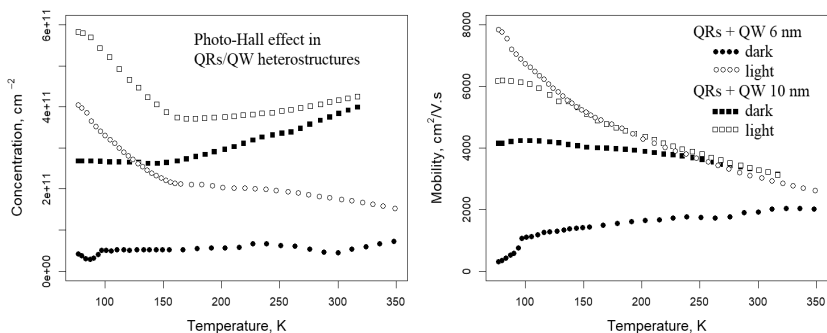


Рис. 1. Температурные зависимости Холловских концентрации и подвижности для образцов с системой КК + КЯ в темноте и при постоянном освещении белым светом

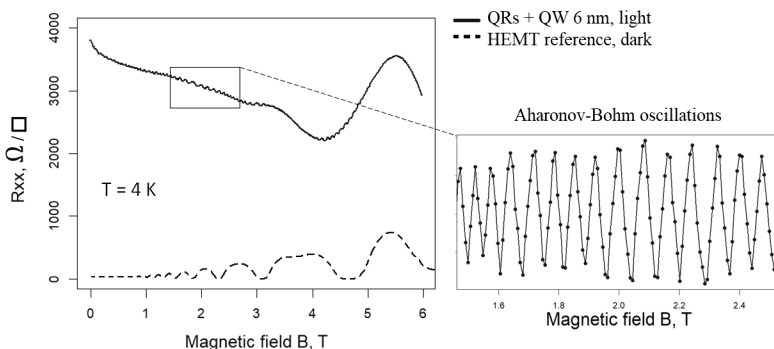


Рис. 2. Магнетосопротивление образца со слоем квантовых колец на КЯ 6 нм и опорного без КК с КЯ 20 нм; осцилляции Ааронова-Бома

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00897 мол_а.

Литература

1. I.R. Pagnossin, E.C.F. da Silva, A.A. Quivy et al., J. of Appl. Phys., 97, 113709 (2005).
2. N.P. Stepina, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov et al., AIP Conf. Proceedings 1610, 59 (2014).
3. M. Kato, A. Endo, Sh. Katsumoto et al., Phys. Rev. B, 77, 155318 (2008).
4. Y.D. Sibirmovsky, I.S. Vasil'evskii, A.N. Vinichenko et al., J. of Phys.: Conf. Ser., 917, 032041 (2017).

**ВЫРАЩЕННЫЕ НА КРЕМНИИ МНОГОСЛОЙНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Ge/SiGe
ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Т.М. Бурбаев, Ю.Г. Садофьев, М.А. Акмаев¹, В.А. Алешкин³, Ю.А. Алешенко^{1,2, *},
А.В. Клековкин^{1,4}, А.В. Муратов¹, А.В. Новиков³, В.В. Ушаков³, П.А. Юнин³, Д.В. Юрасов³**

¹Физический институт им. Лебедева РАН

Россия, 123456, г. Москва, Ленинский проспект, 51, e-mail: aklekovkinbox@gmail.com

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31 e-mail: YAAleshchenko@mephi.ru

³Институт физики микроструктур РАН,

Россия, 603905, г. Нижний Новгород, ул. Академическая, 7 e-mail: director@ipmras.ru

⁴Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН

Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, 7 e-mail: mail@isvch.ru

**GROWING ON SILICON MULTILAYER HETEROSTRUCTURES OF Ge / SiGe
FOR OPTOELECTRONICS**

**Т.М. Burbaev, Yu.G. Sadofyev, М.А. Акмаев¹, V.Ya. Aleshkin³, Yu.A. Aleshchenko^{1,2},
^{*}A.V. Klekovkin^{1,4}, A.V. Muratov¹, A.V. Novikov³, V.V. Ushakov³, P.A. Yunin³
and D.V. Yurasov³**

¹Physical Institute. P. N. Lebedev RAS, 119991, Moscow, Leninsky prospect, 53.

e-mail: aklekovkinbox@gmail.com

²National research nuclear University “MEPhI”, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

e-mail: YAAleshchenko@mephi.ru

³Institute for Physics of Microstructures RAS, 603950, Moscow, Nizhny Novgorod, Academicheskaya Str., 7 e-mail: director@ipmras.ru

⁴Institute of ultrahigh frequency semiconductor electronics RAS, 117105 Moscow, Nagorny proezd, 7 e-mail: mail@isvch.ru

Multilayer type-I $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Ge}$ heterostructures (strain-compensated superlattices) with quantum well systems (QWs) (Ge layers) and barriers ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ layers) were developed and grown on silicon substrates. In the absorption spectra of the grown structures at room temperature, a series of narrow lines were observed that correspond to exciton direct-gap transitions between the valence band and the conduction band in the center of the Brillouin zone (Γ -point). A significant value of the exciton absorption coefficient makes it possible to use the grown structures to create modulators whose operation principle is based on the quantum-confined Stark effect.

Оптоволоконные системы связи получили широкое распространение для высокоскоростной передачи информации. Однако, задача создания монолитно интегрированных на Si-подложках элементов фотоники, пока не решена. Решением этой задачи является разработка элементов фотоники на основе кремний-германиевых гетероструктур.

В данной работе были разработаны и изготовлены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремниевых подложках многослойные $\text{Ge}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ гетероструктуры с системами квантовых ям (слои Ge) и барьеров (слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$). Структуры были выращены на буфере $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$, как показано в [1-3]. Квантовые ямы Ge/SiGe с Ge барьерами, выращенные при определенном соотношении x и y , могут представлять собой гетероструктуры I рода.

Методом спектроскопии в инфракрасной области света выполнены измерения спектров пропускания многослойных гетероструктур $\text{Ge}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. На рис.1 показан спектр пропускания одной из структур. В спектре отчетливо видны минимумы, связанные с поглощением на прямозонных экситонных переходах между валентной зоной и зоной проводимости в центре зоны Бриллюэна (Γ -точке). Энергетическое положение линий соответствует переходам между уровнями размерного квантования для электронов в зоне проводимости и для дырок (тяжелых НН и легких ЛН) в валентной зоне в КЯ слоя Ge.

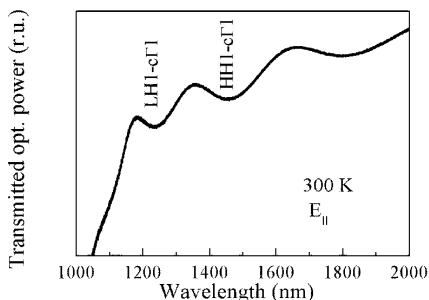


Рис.1 Нормированный спектр пропускания гетероструктуры $\text{Ge}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. $T = 300$ К, вектор E проходящего света параллелен плоскостям слоев

Таким образом, полученные гетероструктуры I рода с прямозонным энергетическим спектром, дают шанс, после улучшения технологии роста (с уменьшением числа дислокаций), на использование подобных структур для создания монолитно интегрированных с кремнием элементов нанофотоники телекоммуникационного диапазона.

В ИК измерениях использовано оборудование ЦКП ФИАН.

Ю.А.А. благодарит за поддержку

Программу Повышения Конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Работа поддержана РФФИ, гранты № 16-02-00986, № 16-29-03352 оф_{и_м} и программами РАН.

Литература

1. L. Colace et al., Appl. Phys. Lett., **72**, 3175 (1998).
2. H.-C. Luan et al., Appl. Phys. Lett., **75**, 2909 (1999).
3. Д.В. Юрасов et al., ФТП, **49**, 1463 (2015).

**ВЫРАЩИВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЯМ $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ ($x < 0.1$) НА ОСНОВЕ
КОРОТКОПЕРИОДНЫХ СВЕРХРЕШЕТОК**

**А.В. Клековкин^{1,2}, И.П. Казаков¹, В.А. Цветков¹, М.А. Акмаев¹, С.А. Зиновьев¹*

¹Физический институт им. Лебедева РАН

Россия, 123456, г. Москва, Ленинский проспект, 51, e-mail: aklekovkinbox@gmail.com

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, 7 e-mail: mail@isvch.ru

**GROWING OF $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ ($x < 0.1$) QUANTUM WELLS BASED ON SHORT-PERIOD
SUPERLATTICE**

**A.V. Klekovkin^{1,2}, I.P. Kazakov¹, V.A. Tsvetkov¹, M.A. Akmaev¹, S.A. Zinovev¹*

¹Physical Institute. P. N. Lebedev RAS, 119991, Moscow, Leninsky prospect, 53.
e-mail: aklekovkinbox@gmail.com

²Institute of ultrahigh frequency semiconductor electronics RAS, 117105 Moscow,
Nagorny proezd, 7, e-mail: mail@isvch.ru

For receive 5 nm $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ quantum well (QW) with $x < 0.1$ were used short-period superlattices (SPS) with $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ ($y > 0.1$) layer «diluted» with Si layers. Samples were grown by molecular beam epitaxy (MBE) on Si(100) substrate. SPS samples consisting of 1.4÷2.8 Å $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ and a 1.4- to 14- Å -thick Si layer. Photoluminescence (PL) spectroscopy were used to analyze the composition of the samples. Intensive lines from QW on PL spectra demonstrate the possibility of obtaining of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (QW) with $x < 0.1$ with using SPS.

Получение квантовых ям (КЯ) $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с $x < 0.1$ существенно затруднено из-за нестабильной работы электронной пушки молекулярного источника Ge при низких значениях тока электронного пучка. В настоящей работе исследовалась возможность создания КЯ $x < 0.1$ на основе короткопериодных сверхрешеток (КСП), в которых твёрдый раствор $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ «разбавлен» прослойками Si. Ранее данный подход применяли для выращивания структур с высоким содержанием германия ($x > 0.4$) [1–3].

Были разработаны и изготовлены методом молекулярно-пучковой эпитаксии $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ одиночные квантовые ямы с $x < 0.1$ с эффективной толщиной ~5 нм, состоящие из нескольких периодически повторяющихся $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ ($y > 0.1$) и Si слоев номинальной толщиной 1.4÷2.8 Å и 1.4÷14 Å, соответственно. Подготовка подложек Si (100) описана в работе [4]. Усредненный состав КЯ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ зависел от толщины, состава и количества слоев $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ и Si (табл. 1). Структуры исследовались методом фотолюминесценции при температурах от 6 до 15 К и уровнях возбуждения до 150 мВт.

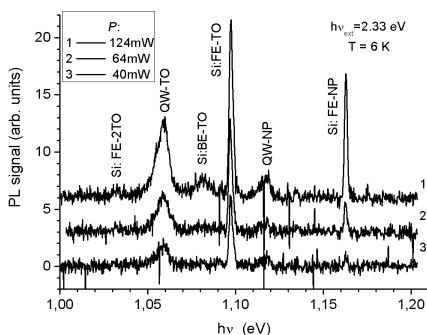


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции для структуры "Е" при $T = 6$ К.

На рис. 1 представлены обзорные спектры ФЛ исследуемой КЯ, снятые при различных мощностях накачки. Наблюдаются интенсивные линии ТО-фононные компоненты спектра от КЯ (линия QW:TO) и кремниевой подложки (линия Si:FE-TO). В излучении кремниевой подложки при большой мощности накачки видна линия связанного экситона Si:BE-TO. Бесфононные компоненты спектра от КЯ (линия QW:NP), и от подложки (линия Si:FE-NP), выражены значительно слабее фононных.

Таблица 1

Схемы одиночных квантовых ям $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

№ структуры	Толщины слоев КСР		Количество периодов, N
	$(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)$, Å	(Si), Å	
A	14	1.4	3
B	3.14	1.4	10
C	2.1	2.1	11
D	1.4	1.4	17
E	2.8	1.4	11

Были выращены КЯ с постоянным составом твердого раствора с x равным усредненному составу КСР. Положение линий излучения на спектрах ФЛ практически совпадают.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность получения квантовых ям $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с $x < 0.1$ на основе короткопериодной сверхрешетки $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\text{Si}$.

Работа поддержана РФФИ, гранты № 16-02-00986 а, № 16-29-03352 офи_м и Программой Президиума РАН.

Литература

1. T.P. Pearsall et al., Phys. Rev., **58**, 729 (1987).
2. E. Kasper, H. Kibbel, and H. Jorke, Phys. Rev. B., **38**, 3599 (1988).
3. T.P. Pearsall, J. Bevk, L.C. Feldman et. al., Phys. Rev. Lett., **58**, 729 (1987).
4. Ю.Г. Садофьев et al., Изв. РАН. Сер. физ., **78**, 47 (2014).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ
ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaInAsP/InP**

**А.Е. Казакова¹, Л.С. Лунин², М.Л. Лунина², Д.А. Арустамян¹*

¹Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова
Россия, 346428 Новочеркасск, ул. Просвещения 132, kazakovaalena92@gmail.com
²Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук
Россия, 344006 Ростов-на-Дону, ул. Чехова 41, e-mail: lunin_ls@mail.ru

**RESEARCH OF LUMINESCENT PROPERTIES
OF HETEROSTRUCTURES AlGaInAsP/InP**

**A.E. Kazakova¹, L.S. Lunin², M.L. Lunina², D.A. Arustamyan¹*

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
Russia, 346428, Prosveshcheniya str., 132, Novocheerkassk,
e-mail: kazakovaalena92@gmail.com
² Federal Research Center Southern Scientific Center Russian Academy of Sciences
Russia, 3464006, Chekhova str., 41, Rostov-on-Don, e-mail: lunin_ls@mail.ru

By the method of zone recrystallization in the temperature gradient field, were obtained the AlGaInAsP solid solutions isoperiodic to the binary substrates of indium phosphide. Photoluminescence measurements were carried out in the spectral range from 500 to 2500 nm at a temperature of 300K, photoluminescence was excited from the side of epitaxial layers. It is shown that an increase in the number of components in a solid solution to five decreases the half-width of the photoluminescence spectra and increases their intensity.

Пятикомпонентные твердые растворы AlGaInAsP были выращены на бинарных подложках фосфида индия, методом зонной перекристаллизации градиентом температуры (ЗПГТ) [1, 2]. Метод ЗПГТ позволяет управлять свойствами и структурным совершенством получаемых гетероструктур, путем программного изменения параметров процесса кристаллизации [3–5].

Целью настоящей работы является исследование спектров фотолюминесценции гетероструктур AlGaInAsP/InP.

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции однородных по составу твердых растворов GaInAs (1), GaInAsP (2) и AlInGaPAs (3), выращенных на подложках фосфида индия. Спектры получены при температуре 300 К. Люминесценция при 300 К в основном обусловлена испускани-

ем, связанным с краем зоны. Сравнивая люминесцентные свойства трех-, четырех- и пятикомпонентных твердых растворов важно отметить несколько отличий. В зависимости от состава гетероструктур происходит смещение максимума спектральной полосы люминесценции.

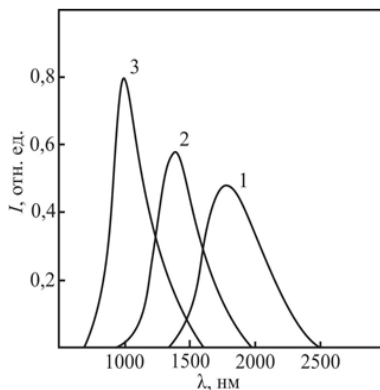


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции гетероструктур: 1 – GaInAs/InP, 2 – GaInAsP/InP, 3 – AlInGaPAs/InP

Для пятикомпонентных твердых растворов характерно увеличение квантового выхода и интенсивности люминесценции, вследствие уменьшения дефектности эпитаксиальных слоев по сравнению с аналогичными трех- и четырех-компонентными гетероструктурами.

Исследования показали, что переход к пятикомпонентным твердым растворам приводит к увеличению интенсивности и уменьшению ширины полосы излучения на половине высоты пиков фотолюминесценции.

Работа выполнена в рамках государственного задания (грант

№ 16.4757.2017/8.9) а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01206 А.

Литература

1. Л.С. Лунин, А.В. Благин, Д.Л. Алфимова. Физика градиентной эпитаксии многокомпонентных полупроводниковых гетероструктур, (Ростов-на-Дону, Изд-во СКНЦ ВШ) 212 с. (2008).
2. Л.С. Лунин, Сысоев И.А. Техника градиентной эпитаксии полупроводниковых гетероструктур электронной техники, (Ростов-на-Дону, Изд-во СКНЦ ВШ) 160 с. (2008).
3. D.L. Alfimova et al., Inorganic Materials, **53**, 1217 (2017).
4. D.L. Alfimova et al., Semiconductors, **51**, 1427 (2017).
5. M.L. Lunina et al., Source of the Document Solid State Phenomena, **265 SSP**, 728-733 (2017).

МЕХАНИЗМ РОСТА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК МЕТОДОМ МЛЭ

**D.A. Kulygin*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: dkylgn@mail.ru

MECHANISM OF GROWTH OF QUANTUM DOTS BY MBE METHOD

**D.A. Kulygin*

National Research Nuclear University MEPhI
Russia, 115409, Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: dkylgn@mail.ru

This article is a review of the theoretical understanding of the physical nature of the formation of quantum dots. An example of the growth of QDs is the structure of InAs/GaAs, a method of growth of molecular beam epitaxy.

Теоретическое понимание физической природы формирования квантовых точек методом молекулярно-лучевой эпитаксии является сложной задачей. Несмотря на то, что ученым известны три механизма роста, нельзя со сто процентной гарантией аналитически предсказать, как будет происходить формирование квантовых точек, так как процесс роста является нелинейным.

Рассмотрим рост КТ. Формирование КТ должно происходить при гетеро-эпитаксии, в данном случае примером является структура InAs/GaAs (001), решеточное несоответствие которой 7.16%. Для начала выращивают буферный слой GaAs для будущих КТ при температуре 580 °С. Когда время доходит до роста КТ, то при осаждении InAs на слой GaAs, между атомами возникнет упругая деформация [1]. И тут может произойти две ситуации: 1) КТ абсолютно не сможет сформироваться из-за гетерогенности атомов или 2) КТ начинают рост с образованием дислокаций. По этой причине применяется смачивающий слой по росту Странского-Крастанова, который позволяет перейти к стабильному состоянию между атомами и снизить напряженность [2]. Смачивающий слой представляет собой осаждение 1.8 монослоя InAs при температуре 520 °С [3]. Далее образец охлаждают до комнатной температуры, а затем вновь нагревают, после происходит непосредственно рост квантовых точек при температуре 500 °С, скорости осаждения 0.1÷0.01 монослоя/сек и давлении 10⁻⁶ торр.

Теперь обратимся к теории формирования КТ. В начале, осаждаемые атомы приземляются на поверхность подложки и становятся адатомами. Адатомы взаимодействуют друг с другом через ближний порядок и объ-

единяются в кластеры, причем в данном случае стадия зарождения преобладает над стадией роста. Падающим атомам энергетически выгодно объединяться со своими адатомными копиями, нежели встраиваться в двумерный островок для его роста. Когда кластеры становятся стабильными, дальнейшее их разрастание приводит к образованию капиллярного эффекта. Так как кластеры разные по размеру, а у малых кластеров имеется большой химический потенциал, они мигрируют через поверхностную диффузию к большим кластерам и объединяются в островки. Затем наступает момент, когда плотность распространения островков становится критической и падающим атомам некуда деваться, кроме как встраиваться в уже сформированные двумерные островки. Стабильный двумерный островок самостоятельно растет, захватывая адатомы. Адатомы, находящиеся с краю островка, являются мобильными и могут отсоединиться от островка или перемещаться вверх, тем самым зарождая новую 2D структуру на вершине основного островка. После роста вершины островка его уже называют трехмерным и все адатомы возле островка находящиеся с краю, начинают подниматься на более высокие уровни, тем самым образуя 3D структуру в виде квантовой точки.

Механизм миграции адатомов снизу-вверх объясняется высокой энергией упругой деформации из-за несоответствия кристаллических решеток по модели Монте-Карло [4]. Вероятно, что упругая деформация влияет на диффузию адатомов, уменьшая энергию связи к поверхности. Поэтому адатомы вынуждены перемещаться и найти для себя менее напряженную область. Известно, что наивысшая точка 3D островка более расслаблена, чем ниже лежащие точки, тем более основание. В результате именно по этой причине и происходит формирование роста 3D островков.

Литература

1. R. J. Asaro and W. A. Tiller, Interface morphology development during stress corrosion cracking (Part I): Via surface diffusion, Metall. Trans., **3**(7), 1789 (1972).
2. Hans J. Scheel. Introduction to Liquid Phase Epitaxy. : Liquid Phase Epitaxy of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials, 19, 8 (2007).
3. Ju Wu., Peng Jin. Frontiers of Physics (2015) 10, 108101. DOI 10.1007/s11467-014-0422-4.
4. Василенко М.А и др., Моделирование методом Монте-Карло процесса формирования наноструктур АПБВ с помощью капельной эпитаксии, АВТОМЕТРИЯ, **52**(5), 111 с. (2016).

ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КОЛЛОИДНЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР CdSe/ZnS

**И.А. Слущинская, А.И. Лебедев, Б.М. Саиджонов, Р.Б. Васильев*

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, тел. +7(495)939-3917, e-mail: irinasluch@gmail.com

LOCAL STRUCTURE OF CdSe/ZnS COLLOIDAL NANOHETEROSTRUCTURES

**I.A. Sluchinskaya, A.I. Lebedev, B.M. Saidzhonov, R.B. Vasiliev*

M.V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie gory, 1, 119991, Moscow, phone +7(495)939-3917, e-mail: irinasluch@gmail.com

Quasi-two-dimensional colloidal nanoheterostructures based on cadmium chalcogenides have recently attracted much attention due to their unique properties which make them promising for creation of various optoelectronic devices. In this work, the stability of the heterointerface of highly-strained CdSe/ZnS nanoheterostructures was studied using EXAFS spectroscopy.

Квазидвумерные коллоидные наногетероструктуры на основе халькогенидов кадмия в последнее время вызывают большой интерес благодаря своим уникальным оптическим свойствам – рекордно узким полосам оптического поглощения и люминесценции, делающих их перспективными для создания различных оптоэлектронных устройств [1]. В настоящей работе представлены результаты исследований локальной структуры наногетероструктур CdSe/ZnS – нанопластинок CdSe, покрытых сверхтонкой оболочкой (1÷3 монослоя) широкозонного полупроводника ZnS – методом EXAFS-спектроскопии.

Коллоидные гетероструктуры CdSe/ZnS на основе нанопластинок CdSe получали методом низкотемпературного последовательного химического осаждения оболочки – монослоев серы и цинка в полярном растворителе при комнатной температуре. Исходные нанопластины CdSe получали коллоидным методом в октаэдрене в инертной атмосфере с использованием ацетата кадмия при температурах 130÷230 °С [2].

Основанием для настоящих исследований послужили результаты расчетов энергетики наногетероструктур CdSe/ZnS с различной последовательностью слоев на гетерогранице. Если учесть сильное различие параметров решетки компонент гетероструктуры (более 10 %) и большую роль, которую могут играть диффузионные процессы в нанобъектах, то в исследуемых структурах весьма вероятен обмен катионами и/или анионами на гетерогранице, в особенности, если этот процесс энергетически выгоден. Решение этих вопросов необходимо для оценки стабильности при-

боров, изготовленных на основе этих гетероструктур. Ранее подобные процессы обмена наблюдались в сверхрешетках CdSe/ZnTe методом EXAFS-спектроскопии [3].

В настоящей работе с помощью расчетов из первых принципов с использованием программы ABINIT была рассчитана энергетика гетероструктур с различной последовательностью размещения атомов в слоях. Сравнение полученных результатов показало, что наименьшей энергией обладает конфигурация, получающаяся при обмене положениями атомов Cd и Zn на гетерогранице. Выигрыш энергии при таком обмене составляет 0.098 эВ и, по-видимому, связан с уменьшением упругой энергии. Обмен положениями атомов S и Se в наногетероструктурах требует затраты энергии в 0.073 эВ и энергетически не выгоден.

Поскольку предполагаемая перестройка структуры должна сопровождаться сильными изменениями в локальном окружении атомов Zn, для изучения этого окружения было использовано измерение тонкой структуры в спектрах рентгеновского поглощения (EXAFS) на *K*-крае цинка (9.659 кэВ). Измерения проводились на источнике синхротронного излучения BESSY при комнатной температуре. Полученные спектры EXAFS сравнивались со спектрами, рассчитанными для двух структурных моделей – с обменом катионов Cd и Zn и без него. Расчетные положения атомов в этих моделях были определены при расчете энергетики этих структур.

Сопоставление экспериментальных спектров с расчетными показало, что структура локального окружения цинка лучше описывается моделью, отвечающей метастабильному состоянию без обмена катионов. Таким образом, длительное хранение образцов в течение месяцев не приводит к заметному диффузионному обмену катионами и сохраняет устойчивой метастабильную структуру.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-03-00704 и 16-29-11694. Авторы благодарны коллективу BESSY за возможность проведения измерений.

Литература

1. A.G. Vitukhnovsky, V.S. Lebedev, A.S. Selyukov, A.A. Vashchenko, R.B. Vasiliev, M.S. Sokolikova, Chem. Phys. Lett., **619**, 185 (2015).
2. N.N. Shlenskaya, Y. Yao, M. Takaaki, T. Kuroda, A.V. Garshev, V.F. Kozlovskii, A.M. Gaskov, R.B. Vasiliev, K. Sakoda, Chem. Mater., **29**, 579 (2017).
3. K.M. Kemner, B.A. Bunker, A.J. Kropf, H. Luo, N. Samarth, J.K. Furdyna, M.R. Weidmann, K.E. Newman, Phys. Rev. B, **50**, 14327 (1994).

СПОНТАННОЕ СВОРАЧИВАНИЕ АТОМНО-ТОНКИХ НАНОЛИСТОВ CdTe И CdSe: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

**Р.Б. Васильев, Д.А. Карлова, А.В. Гаршев, А.М. Гаскков*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, e-mail: romvas@inorg.chem.msu.ru

SPONTANEOUS ROLLING UP OF ULTRATHIN COLLOIDAL CdTe AND CdSe NANOSHEETS: SYNTHESIS, STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES

**R.B. Vasiliev, D.A. Karlova, A.V. Garshev, A.M. Gaskov*

Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory

Two-dimensional (2D) semiconductors exhibit unique electronic and optical properties arising from the atomic-scale thickness and 2D electronic structure. However, it is usually limited by an intrinsically flat morphology of 2D materials. In present work, we report an effect of spontaneous folding of quasi-2D CdTe and CdSe nanosheets and analyze its impact on a structure and optical properties.

Двумерные (2D) полупроводники обладают уникальными электронными и оптическими свойствами, возникающими из-за атомно-тонкой толщины и двумерной электронной структуры. Однако, как правило, свойства изученных двумерных материалов ограничены нативной плоской морфологией 2D-материалов. В настоящей работе мы изучили свойства атомно-тонких наноллистов CdTe и CdSe. Данные квазидвумерные наночастицы интересны благодаря чрезвычайно узким полосам поглощения и люминесценции и иначе называются коллоидными квантовыми ямами (quantum wells) [1]. Мы обнаружили эффект спонтанного сворачивания данных квазидвумерных листов и анализируем его влияние на структуру и оптические свойства коллоидных квантовых ям.

Рост наноллистов CdSe и CdTe проводили коллоидным методом в растворе ацетат кадмия -олеиновая кислота – октадецена при 110÷200 °С [2]. Тщательный подбор условий синтеза позволил нам вырастить предельно тонкие наноллисты с протяженными латеральными размерами. По данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) наноллисты имели толщину 1÷2 нм (4÷7 монослоев) и латеральные размеры до 1 мкм. Сразу после синтеза наночастицы были покрыты олеиновой кислотой, химически связанной с базальными плоскостями наночастиц. Для модификации свойств проводили обмен лигандов как в неполярной (гексан), так и в полярной фазе (метилформамид) с тиол-содержащими молекулами. Анализ

кристаллической структуры, морфологии, элементного состава и покрытия поверхности лигандами был проведен с использованием методов HRTEM, HAADF-STEM, SAED, XRD и FTIR.

Мы показали, что в случае наночастиц CdTe первоначально плоские нанолиты CdTe спонтанно сворачиваются при замене олеиновой кислоты тиолами. Подробное исследование методом ПЭМ показало достаточно совершенные плоские листы CdTe сразу после роста с формой, близкой квадратной, и размерами порядка 200 нм. Электронная дифракция подтвердила фазу цинковой обманки с направлением [001], нормальным к плоскости листа. Электронная дифракция с единичной наночастицы имела точечный характер, что указывает на монокристалльный характер индивидуальных наночастиц. При взаимодействии с тиолом происходит присоединение молекул тиола к поверхностным атомам кадмия с замещением олеиновой кислоты. Плоские листы свернулись в аккуратные многостенные свертки с внутренним диаметром $10\div 20$ нм в зависимости от толщины исходных наночастиц. Методом электронной дифракции показано, что сворачивание происходит вдоль направления [110], при этом сохраняется монокристалльный характер листов. В случае двумерных листов CdSe были обнаружены, что листы изначально свернуты в многослойные свертки. Латеральный размер свертков в зависимости от условий синтеза варьировался в диапазоне от 100 нм до 1 мкм при толщине порядка $1.2\div 1.5$ нм. Показано, что полученные свертки разворачиваются при присоединении тиола в случае наночастиц толщиной 1.5 нм, или остаются свернутыми с переориентацией направления сворачивания. По данным электронной дифракции наблюдался монокристалльный характер индивидуальных наночастиц.

В оптических свойствах нанолитов наблюдались узкие экситонные полосы [2]. После присоединения тиола и сворачивания листов происходит красный сдвиг экситонных полос с одновременным их уширением с сохранением двумерные оптические свойства. В докладе обсуждается механизм сворачивания, его влияние на оптические свойства, а также перспективы практического использования данного эффекта.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-03-00704 и 16-29-11694.

Литература

1. M. Nasilowski et al., Chem. Rev., **116**, 10934 (2016).
2. N.N. Shlenskaya et al., Chem. Mater., **29**, 579 (2017).
3. R.B. Vasiliev et al., Phys. Rev. B, **95**, 165414 (2017).

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР CdSe/CdS
МЕТОДАМИ ИК- И РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

*Р.Б. Васильев¹, К.А. Дроздов¹, В.Ф. Козловский¹, *А.И. Лебедев¹, Б.М. Саиджонов¹,
А.А. Хомич²*

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, тел. e-mail: swan@scon155.phys.msu.ru

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, 119991, Москва

**STUDY OF CdSe/CdS NANOHETEROSTRUCTURES
USING INFRARED AND RAMAN SPECTROSCOPIES**

*R.B. Vasiliev¹, K.A. Drozdov¹, V.F. Kozlovskii¹, *A.I. Lebedev¹, B.M. Saidzhonov¹,
A.A. Khomich²*

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow

e-mail: swan@scon155.phys.msu.ru

²A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Vavilov str., 38, 119991, Moscow

Quasi-two-dimensional colloidal nanocrystals of cadmium chalcogenides and nanoheterostructures based on them attract much attention due to their unique optical and electronic properties which are promising for development of light-emitting devices, biomarkers, and lasers. In this work, infrared and Raman spectroscopies are used to study the lattice dynamics of CdSe/CdS nanoheterostructures. The obtained data are in reasonable agreement with the results of first-principles calculations of these structures.

В последнее время коллоидные квазидвумерные нанокристаллы халькогенидов кадмия и гетероструктуры на их основе привлекают большое внимание, что связано с их уникальными оптическими и электронными свойствами. Эти низкоразмерные структуры характеризуются узкими полосами люминесценции, коротким временем жизни носителей заряда и большим сечением поглощения, что делает их идеальными материалами для создания светоизлучающих элементов, биомаркеров и лазеров [1]. Несмотря на большое число публикаций, посвященных квазидвумерным нанокристаллам, систематические исследования динамики кристаллической решетки как этих нанокристаллов, так и построенных на их основе гетероструктур отсутствуют. В то же время анализ колебательных спектров может дать важную информацию о составе нанокристаллов, структурных напряжениях в них и о взаимодействии нанокристаллов с их окружением. В настоящей работе изучены особенности колебательного спектра наногетероструктур CdSe/CdS методами инфракрасной (ИК) и рамановской спектроскопии. Для анализа полученных данных использу-

ются результаты расчетов динамики решетки этих гетероструктур из первых принципов.

Синтез квазидвумерных нанокристаллов CdSe проводился коллоидным методом [2]. Наногетероструктуры CdSe/CdS на основе нанопластинок CdSe с толщиной оболочки до трех монослоев CdS были получены методом послойного осаждения в полярной среде (*n*-метилформамид). Полученные образцы были охарактеризованы методами спектроскопии оптического поглощения, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновской дифракции. По данным ПЭМ, наночастицы имели весьма совершенную плоскую прямоугольную форму с латеральными размерами порядка 100 нм и толщиной $1.5 \div 4$ нм. Колебательные спектры образцов исследовались методами инфракрасной и рамановской спектроскопии. ИК-спектры пропускания были получены с помощью Фурье-спектрометра VERTEX 70v в диапазоне частот от 50 до 700 см^{-1} . Рамановские спектры записывались на спектрометре Jobin Yvon LabRAM HR800 при возбуждении полупроводниковым лазером с $\lambda = 473 \text{ нм}$.

Для идентификации полос в колебательных спектрах гетероструктур аналогично работе [3] из первых принципов с помощью программы AVINIT были рассчитаны равновесная геометрия, частоты нормальных колебаний, силы осцилляторов и рамановские тензоры, необходимые для моделирования ИК- и рамановских спектров. Частоты колебаний оказались сильно зависящими как от двуслойной деформации нанопластинок, вызванной поверхностными атомами, так и толщины оболочки (при наращивании оболочки из CdS происходит двуслойное сжатие пластинки). Усреднение частот групп фононов с учетом их вкладов в ИК- и рамановские спектры позволил однозначно идентифицировать три группы инфракрасных и три группы рамановских мод, расчетные частоты которых находятся в разумном согласии с экспериментальными данными и систематически изменяются при изменении толщины оболочки. Как и в случае нанопластинок из CdSe [3], преобладающий вклад в рамановские спектры дают моды симметрии A_1 с небольшой примесью мод B_2 , а инфракрасные спектры определяются модами симметрии E и модой B_2 в наклонной по отношению к поверхности нанопластинки геометрии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-03-00704 и 16-29-11694.

Литература

1. M. Nasilowski, B. Mahler, E. Lhuillier et al., Chem. Rev., **116**, 10934 (2016).
2. N.N. Shlenskaya et al., Chem. Mater., **29**, 579 (2017).
3. A.I. Lebedev, Phys. Rev. B, **96**, 184306 (2017).

**ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ
НА БАЗЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР
С САМОФОРМИРУЮЩИМИСЯ НАНООСТРОВКАМИ Ge(Si). ПРОЦЕССЫ
РЕЗОНАНСНОГО И НЕРЕЗОНАНСНОГО УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

**М.В. Степихова, А.Н. Яблонский, С.М. Сергеев, Е.В. Скороходов, М.В. Шалеев,
А.В. Новиков, З.Ф. Красильник*

Институт физики микроструктур РАН
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105, e-mail: mst@ipm.sci-nnov.ru

**PHOTONIC CRYSTAL CAVITIES ON THE BASIS OF SILICON LIGHT-EMITTING
STRUCTURES WITH SELF-ASSEMBLED Ge(Si) NANOSLANDS. THE PROCESSES
OF RESONANT AND NON-RESONANT PHOTOLUMINESCENCE ENHANCEMENT**

**M.V. Stepihova, A.N. Yablonskiy, S.M. Sergeev, E.V. Skorokhodov, M.V. Shaleev,
A.V. Novikov, Z.F. Krasilnik*

Institute for Physics of Microstructures RAS
Russia, 603950 Nizhny Novgorod, GSP-105, e-mail: mst@ipm.sci-nnov.ru

In this work, we analyze the luminescent properties of photonic crystal cavities formed on light-emitting silicon structures with the self-assembled Ge(Si) nanoislands. The mechanisms of resonant (due to the interaction of the emitting medium with the cavity modes) and non-resonant (due to the interaction of the emitting medium with the radiant photonic crystal modes) enhancement of the photoluminescence response in such structures are discussed. In photonic crystal cavities, an enhancement of the photoluminescence response related with Ge(Si) nanoislands exceeds an order of magnitude.

Интерес к фотонным кристаллам и резонаторам на их основе вызван с одной стороны – новыми возможностями контроля процессов излучения и взаимодействия света с излучающей средой в таких структурах, с другой – открывающимися новыми возможностями создания на их основе перспективных устройств нанофотоники, нелинейной оптики, микросенсорики и др. [1].

В данной работе рассмотрены излучающие свойства фотонно-кристаллических (ФК) резонаторов, сформированных на базе кремниевых структур с самоформирующимися наноостровками Ge(Si). Показана возможность резонансного (обусловленного взаимодействием излучающей среды с модами резонатора) и нерезонансного (обусловленного взаимодействием среды с радиационными модами ФК) усиления сигнала фотолюминесценции (ФЛ) наноостровков Ge(Si) в таких системах. Изучены резонаторы с $L3$ геометрией дефекта (рис. 1а).

Показано, что условия наблюдения резонансных и нерезонансных процессов усиления определяются параметрами фотонного кристалла, а именно – периодом решетки (a). Усиление сигнала ФЛ на основных модах ФК-резонатора с характерной тонкой структурой спектра (рис. 1б) наблюдалось в резонаторах с периодом решетки ФК $a = 450$ нм, при радиусе отверстий $r/a = 0.3 \div 0.4$. При больших периодах решетки ($a = 570, 600$ нм) проявляются процессы нерезонансного усиления, непосредственно не связанные с модами резонатора, и наблюдаемые как при условии возбуждения и детектирования сигнала ФЛ в области резонатора, так и вне его (рис. 1в). Последние хорошо описываются в рамках модели взаимодействия излучающей среды с модами ФК, локализованными в Γ точке зоны Бриллюэна. В обоих случаях наблюдаемое в таких структурах усиление сигнала ФЛ превышало порядок величины.

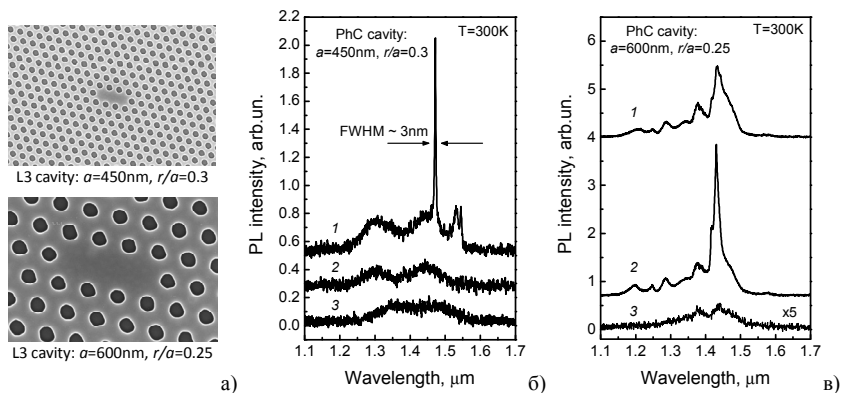


Рис. 1. Снимки, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (а), и результаты люминесцентных исследований (б, в) фотонно-кристаллических резонаторов, сформированных на структурах с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si). Цифры на рисунках б) и в) соответствуют условиям измерений спектров микро-ФЛ: 1 – фокусировка и детектирование сигнала в области резонатора (L3 дефекта в ФК), 2 – фокусировка и детектирование сигнала в области ФК, вне резонатора, 3 – фокусировка и детектирование сигнала вне ФК, в непроцессированной области образца

Работа поддержана программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий».

Литература

1. S. Noda, J. Lightwave, Technol., **24**(12), 4554-4567 (2006).

**ЛЕГИРОВАННЫЕ ЛАНТАНОИДАМИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОРОШКИ
АЛЮМОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА,
СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ**

*Л.С. Хорошко¹, М.В. Руденко¹, *Н.В. Гапоненко^{1,2}, К.В. Шейдакова¹, К.С. Сукалин¹,
Т.Ф. Райченок³, А.В. Мудрый⁴*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: nik@nano.bsuir.edu.by

²НИЯУ МИФИ, Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.

³Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
Беларусь, 220072, г. Минск, пр-т Независимости, дом 68-2

⁴ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,
Беларусь, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 19

**YTTRIUM ALUMINUM GARNET NANOSTRUCTURED POWDERS DOPED
WITH LANTHANIDES SYNTHESIZED BY SOL-GEL METHOD**

*L.S. Khoroshko¹, M.V. Rudenko¹, *N.V. Gaponenko^{1,2}, K.V. Shaidakova¹, K.S. Sukalin¹,
T.F. Raichyonok³, A.V. Mudry⁴*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Belarus, 220013, Minsk, P. Browki str. 44, e-mail: nik@nano.bsuir.edu.by

²NRNU MEPhI, Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

³B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus,
Belarus, 220072, Minsk, Nezavisimosti Ave. 68-2

⁴Scientific and Practical Materials Research of the NAS of Belarus,
Belarus, 220013, Minsk, P. Browki str. 19

In this work we report on sol-gel synthesis and photoluminescence (PL) of yttrium alumina garnet powders doped with trivalent Tb, Nd and Er. Strong room-temperature PL of lanthanides is observed from the powders: visible Tb-related PL with maximum at 545 nm (excitation wavelength 270 nm), infrared luminescence of Nd at 1064 nm and of Er at 1540 nm (excitation wavelength 532 nm), and Er up-conversion with maximum near 660 nm (excitation wavelength 980 nm).

Легированные лантаноидами материалы, получаемые золь-гель методом, демонстрируют интенсивную фотолюминесценцию (ФЛ) и перспективны для конверсии ионизирующих излучений [1, 2]. В данной работе рассмотрены результаты золь-гель синтеза и анализа морфологии и ФЛ наноструктурированных порошков алюмоиттриевого граната (АИГ), легированных тербием, неодимом и эрбием.

Порошки АИГ, легированные тербием и эрбием, получали золь-гель методом с многостадийным высушиванием золь с окончательным отжигом при 1000 °С в течение 30 мин (для легированных Tb, Er) и 3 ч (для

легированных Nd). Формирование монофазных порошков граната $Y_3Al_5O_{12}$ подтверждено рентгенодифракционным анализом, размер кристаллитов составил $25 \div 48$ нм. Зарегистрирована интенсивная ФЛ тербия с максимумом 543 нм и люминесценция неодима и эрбия в инфракрасном диапазоне с максимумами 1064 и 1540 нм соответственно в полученных наноструктурированных порошках (рис. 1). В порошках АИГ:Er также зарегистрирована ап-конверсия при возбуждении излучением с длиной волны 979 нм (рис. 1 б).

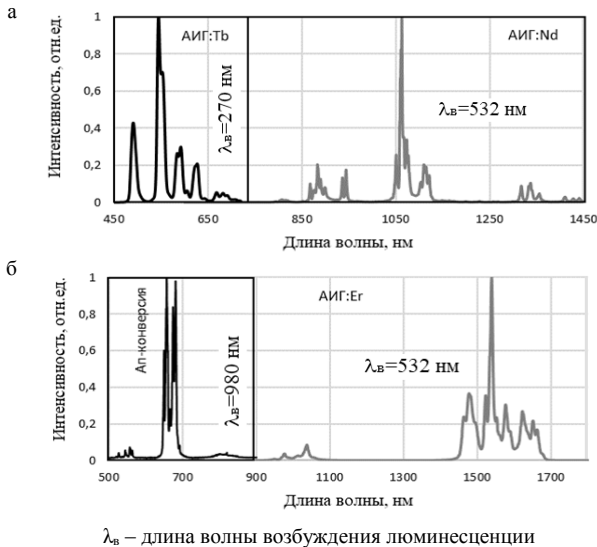


Рис. 1. Спектры люминесценции порошков АИГ, легированных тербием (а, слева), неодимом (а, справа) и эрбием (б)

Полученные золь-гель методом наноструктурированные монофазные порошки легированного АИГ, демонстрирующие люминесценцию лантаноидов, перспективны для формирования люминофоров на различных подложках из порошковых дисперсий в пленкообразующих золях [3]. Ап-конверсия эрбия в АИГ представляет интерес для разработки покрытий, формируемых на тыльной стороне солнечных элементов, не имеющих нижнего металлического контакта [4].

Литература

1. N.V. Garonenko, Acta Phys. Pol., A **112**, 737 (2007).
2. М.В. Коржик, Физика сцинтилляторов на основе кислородных монокристаллов, Мн, 262 с. (2003).
3. Л.С. Хорошко и др., Докл. БГУИР, **104**, 58 (2017).
4. A. Shalav et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **91**, 829 (2007).

**ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА НАНОПЛЕНКИ
ДИСПРОЗИЯ-НАНОКЛАСТЕРЫ Si, Ge И SiGe**

**А.С. Строгова, А.А. Ковалевский, С.В. Гранько, Я.С. Воронец*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: strogova@bsuir.by

**ELEMENT STRUCTURE ON LIMIT OF THE SECTION
OF THE NANOFILM OF DISPROZIYA-NANOKLASTERY OF Si, Ge AND SiGe**

**A.S. Strogova, A.A. Kovalevskii, S.V. Granko, Y.S. Voronec*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013, Minsk, St. Browki, 6, strogova@bsuir.by

Important stage of researches during creation of modern MDS structures are experiments on sharing in their structure of nanofilms and nanoclusters [1].

By Auger spectroscopy method of element structure of MDS structures with nanofilms of oxide of dysprosium and nanoclusters of Si, Ge and SiGe, Dy_xO_y (the locking dielectric layer) – SiGe– Dy_xO_y clusters (a tunnel layer of dielectric) – distribution of silicon and Germany in dysprosium dioxide has allowed to establish to Si with a big hysteresis of the C-V characteristics ($\Delta V \sim 1 \div 1.5$ V) a research.

Auger profile analysis of concentration of elements has shown that silicon is almost evenly distributed on thickness of the locking (thick) layer of oxide of dysprosium. The local maximum of concentration of silicon connected with Si nanoclusters on Auger profiles isn't observed.

В зависимости от состояния поверхности нанокристаллы кремния, германия и твердого раствора кремний-германий могут отличаться от объёмных значений, как в меньшую, так и в большую сторону. В частности, кристаллические объекты с минимальным размеров менее 20 нм неустойчивы по отношению к захвату вакансий и, следовательно, не могут существовать в структуре решетки типа алмаз, если не приняты меры к стабилизации исходной поверхности. Требуется либо выбор подходящего диэлектрического слоя, либо закрепление поверхностных атомов в достаточно жесткой матрице. Атомы кремния в случае свободной поверхности нанокластера, дрейфуют на поверхность, а в нанокристаллах с димеризованной поверхностью, к центру кристаллита.

Важным этапом исследований при создании современных МДП-структур являются эксперименты по совместному использованию в их структуре нанопленок и нанокластеров [1].

Исследование методом Оже-спектроскопии элементного состава МДП-структур с нанопленками оксида диспрозия и нанокластерами Si , Ge и $SiGe$, Dy_xO_y (запирающий слой диэлектрика) – кластеры $SiGe-Dy_xO_y$ (туннельный слой диэлектрика) – Si с большим гистерезисом $C-V$ характеристик ($\Delta V \sim 1 \div 1.5$ В) позволило установить распределение кремния и германия в диоксиде диспрозия.

На рисунке 1а показаны профили концентраций элементов в (запирающий слой диэлектрика) – кластеры $SiGe-Dy_xO_y$ (туннельный слой диэлектрика) – Si при послыном травлении ионами Ar^+ .

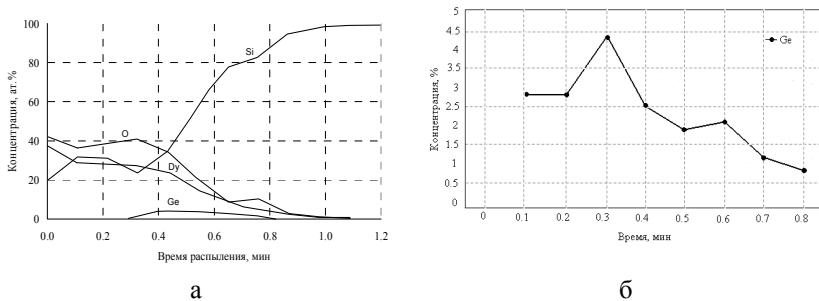


Рис. 1. Профили концентраций элементов (а) и концентрации Ge (б) в структуре Dy_xO_y

Анализ Оже-профилей концентраций элементов показал, что кремний практически равномерно распределяется по толщине запирающего (толстого) слоя оксида диспрозия. Локальный максимум концентрации кремния, связанный с Si нанокластерами, на Оже-профилях не наблюдается. Во внешнем слое пленки Dy_xO_y , концентрация кремния заметно уменьшается (< 20 ат. %). В этом слое преобладают атомы диспрозия и кислорода. Иная картина наблюдается для атомов Ge . На рисунке 1 б виден максимум концентрации Ge при времени распыления $\sim 0.3 \div 0.4$ мин. Максимум концентрации Ge четко локализован и хорошо воспроизводится. Атомная концентрация Ge лежит в пределах $2 \div 5$ ат. %.

Литература

1. О.М. Комар, А.А. Ковалевский, А.С. Строгова, LAP Lambert Academic Publishing, 353 С. (2016).

ОСОБЕННОСТИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ AlGaN/GaN ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ СЛОЯ GaN УГЛЕРОДОМ И ЖЕЛЕЗОМ

*Т.Ф. Русак, *К.Л. Енишерлова, А.В. Лютцау, В.В. Сарайкин, В.И. Корнеев*

АО «НПП «Пульсар»,
105187, Москва, Окружной проезд, 27, e-mail: enisherlova@pulsampp.ru

DISLOCATION STRUCTURE FEATURES OF EPITAXIAL LAYERS AlGaN/GaN IN THE CASE OF DOPING OF THE LAYE GaN Fe AND C.

*T.F. Rusak, *K.L. Enisherlova, A.V. Lutzau, V.V. Sarayikin, V.I. Korneev*

JSC "S&PE" Pulsar,
Okružnoi proezd, 27, 105187, Moscow, e-mail: enisherlova@pulsampp.ru

The influence of doping by Fe and C on the dislocation structure of the layer GaN in AlGaN/GaN/ α -Al₂O₃ heterostructures was investigated. It is shown that doping by C can change the nucleation process of GaN formation and lead to a decrease of the dislocation density in the heterostructure.

Цель: исследование влияния процесса легирования слоя GaN Fe и C для нейтрализации донорных центров на особенности роста эпитаксиальных пленок и их дислокационную структуру.

Объект исследования – гетероструктуры, выращенные МOCVD-эпитаксией на α -Al₂O₃ (0001) со слоями: GaN (2÷2.5 мкм), AlGaN (20 нм) и i-GaN – 2÷2.5 нм. Fe или C вводились в процессе эпитаксии в нижнюю часть слоя GaN. Для уточнения распределения Fe и C в слоях использовалась масс-спектроскопия вторичных ионов (ВИМС). Показано, что концентрация C на уровне $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, ширина нелегированного слоя между легированной частью и границей AlGaN/GaN – 0.1 мкм с резким фронтом падения концентрации. Такое же распределение у Fe, но с размытием фронта концентрации и наличием Fe в слое AlGaN, что говорит о возможности диффузии Fe в активные области прибора.

Дислокационная структура слоев анализировалась методом селективного травления поверхностей структур и сферических шлифов в растворе H₃PO₄ при 300 °С и в КОН при 500 °С; шлифы изготавливались до и после травления, что позволяло изучать распределение дислокаций по толщине GaN (рис. 1а) и определять начало роста дислокаций по глубине. Установлено, что в образцах без Fe и C максимальная плотность дислокаций в центральной части пленок (рис. 1а). У образцов с Fe большинство дислокаций, начинающихся от подложки или в центральной части пленки, выходят на поверхность. Картина, наблюдаемая на образцах с C, отличается от остальных:

меньшая плотность фигур травления с резким падением плотности на границе с подложкой (светлое кольцо, рис. 1в); видны только дислокации, рост которых начался выше середины эпитаксиального слоя; дислокации, зародившиеся ниже, не дорастают до слоя AlGaIn. Отсутствуют и границы блоков, наблюдаемые на нелегированных образцах. Связь между дислокационной структурой и изменением параметров кристаллической решетки, в частности, изменение угла наклона кристаллографических плоскостей при росте, анализировалась методом рентгеновской дифрактометрии с фиксацией угла установки трубки и максимального значения интенсивности дифракционного пика. Съемка проводилась при большом шаге и диапазоне отклонений от угла Брэгга. На всех образцах наблюдались три максимума интенсивности. Наиболее четко – на образце с С, наименее заметно – на образце с Fe. Возможно, что на каждом этапе роста пленки существуют преимущественные углы наклона образующихся плоскостей, что и приводит к появлению максимумов. Для образцов с С отсутствие блоков и дислокаций на начальном этапе позволяет предположить, что рост пленки начинается с образования монослоя с параметром решетки близким к GaN – возможно образование углеродного монослоя. Таким образом, показано, что легирование Fe и С слоя GaN, может улучшать не только диэлектрические свойства буферного слоя, но и влиять на само формирование пленок. Легирование углеродом может изменять характер формирования зародышевого слоя при эпитаксиальном росте и обеспечивать получение более совершенных по структуре пленок.

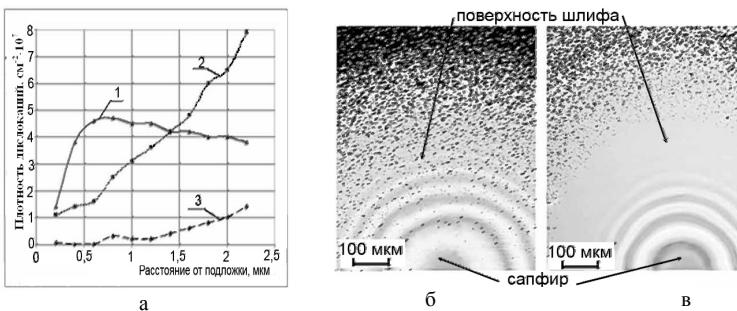


Рис.1. Распределение плотности дислокаций по толщине слоя GaN: а- зависимость плотности дислокаций от глубины; 1 – нелегированный образец; 2- легирование Fe; 3 – легирование С; б, в – картины распределения фигур травления на поверхностях шлифов на: б – нелегированном и в- легированном углеродом образцах, соответственно

**СПОСОБ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР
AlGaN/GaN ПОШАГОВЫМ НАКЛОНОМ ПЛОСКОСТИ ДИФРАКЦИИ
НА ОДНОКРИСТАЛЬНОМ ДИФРАКТОМЕТРЕ XMD-300**

*A.V. Лютцау, Э.М. Темпер, *К.Л. Енишерлова, Ю.В. Колковский*

АО «НПП «Пульсар»
Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, дом 27, e-mail: enisherlova@pulsampp.ru

**METHOD OF EVOLUATING THE STRESS STATE OF HETEROSTRUCTURES
AlGaN/GaN STEP-BY-STEP INCLINATION OF THE DIFFRACTION PLANE
ON THE SINGLE-CRYSTAL DIFFRACTOMETER XMD-300**

*A.V. Lutzaу, E.M. Temper, *K.L. Enisherlova, Yu.V. Kolkovsky*

J&C «S&PE «Pulsar»
Russia, 105187, Moscow, Okružhnoy proezd 27, e-mail: enisherlova@pulsampp.ru

The stress-strain state of individual layers of the AlGaN/GaN heterostructures is one of the characteristics determining the parameters of the devices formed on these structures. It was shown that by the method step-by-step inclination of the diffraction plane on the diffractometer XMD-300, it is possible to estimate the stress-strain state of the individual layers of the AlGaN/GaN heterostructures.

Напряжённо-деформированное состояние отдельных слоёв гетероструктур AlGaN/GaN является одной из характеристик, определяющих параметры приборов, сформированных на этих структурах. Наиболее объективным способом оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) слоёв гетероструктур в процессе проведения различных технологических операций является определение изменений в межплоскостных расстояниях кристаллографических плоскостей, расположенных под углом к направлениям действующих упругих деформаций. Это постулируется псевдо двухмерностью изучаемого объекта (тонкие слои гетероструктуры). Определить упругую деформацию в кристаллических решётках монокристаллических слоёв гетероструктуры по изменению параметра решётки в направлении, лежащем в плоскости этих слоёв практически невозможно, поэтому прибегают к определению параметров кристаллической решётки в направлениях, приближающихся к искомому. Это достигается путём последовательных наклонов плоскости дифракции, положение первичного и дифрагированного пучка рентгеновских лучей в которой соответствует отражениям от плоскостей с данными индексами (плоскостей, не лежащих в плоскости интерфейса гетероструктуры).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДЕФЕКТОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С МЕТАМОРФНЫМ БУФЕРОМ InAlAs**

*Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, *С.С. Пушкарёв, А.Н. Клочков, В.Б. Копылов*

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр. 5, e-mail: serp456207@gmail.com

**PHOTOLUMINESCENCE OF DIFFERENT TYPE DEFECTS IN
HETEROSTRUCTURES WITH METAMORPHIC BUFFER InAlAs**

*G.B. Galiev, E.A. Klimov, *S.S. Pushkarev, A.N. Klochkov, V.B. Kopylov*

Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagornyi proezd, 7/5, e-mail: serp456207@gmail.com

The metamorphic heterostructures were grown by molecular-beam epitaxy and contain different type of dominant defects in metamorphic buffer InAlAs: the dislocations in the one case and the stacking faults in the other case, as it was early shown by transmission electron microscopy. The energy levels associated with these defects were investigated by photoluminescence (PL) spectroscopy, namely by Arrhenius analysis of PL temperature quenching and by analysis of PL intensity as a function of excitation power.

Протяжённые дефекты (дислокации, дефекты упаковки, дефекты двойникования, границы доменов или зёрен), являясь нарушениями периодического потенциала правильной кристаллической структуры, создают дополнительные энергетические уровни внутри запрещённой зоны полупроводника. Эти энергетические уровни располагаются настолько близко друг к другу, что дают возможность фотовозбуждённым носителям заряда, оказавшимся в окрестности такого дефекта, безызлучательно рекомбинировать, тратя свою энергию маленькими порциями на излучение фононов. Дислокации при картографировании межзонной фотолюминесценции (ФЛ) полупроводникового образца выглядят как тёмные пятна, поскольку вблизи них безызлучательная рекомбинация преобладает над излучательной [1, 2]. Увеличение дефектности метаморфного буфера приводит к уменьшению интенсивности межзонной ФЛ от вышележащего слоя [3, 4], так как дефекты из метаморфного буфера прорастают в вышележащую активную область.

С другой стороны, через энергетические уровни протяжённых дефектов происходит также и излучательная рекомбинация, поскольку наблюдается фотолюминесценция, связанная именно с дефектами. Так, дислокации несоответствия, образующиеся при эпитаксиальном выращивании

слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.08 < x < 0.17$) на подложке GaAs, приводят к появлению нескольких широких перекрывающихся пиков в области энергий $0.83 \div 1.13$ эВ [5] либо хорошо выраженного пика в области $0.83 \div 0.87$ эВ на спектрах ФЛ [6], интенсивность которого увеличивается при увеличении плотности дислокаций. В работе [7] показано, что хотя межзонная ФЛ кристаллов GaAs, выращенных методом Чохральского, подавлена в области $5 \div 10$ мкм вокруг отдельной дислокации, но она, наоборот, усилена в области $50 \div 200$ мкм вокруг дислокации, из чего делается вывод, что эта область свободна от неких центров безызлучательной рекомбинации, которые образуются в процессе роста кристалла и взаимодействуют с дислокациями, в результате чего происходит их пространственное перераспределение.

Таким образом, протяжённые дефекты в (In, Ga, Al)As обладают зонным спектром, который способствует одновременно и излучательной, и безызлучательной рекомбинации носителей заряда. Складывается неоднозначная ситуация, которая требует прояснения.

Для этого были исследованы ранее выращенные методом молекулярно-лучковой эпитаксии метаморфные гетероструктуры 830 и 842 на подложках GaAs. В метаморфных буферах $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.05 \rightarrow 0.68$) этих гетероструктур с помощью просвечивающей электронной микроскопии были идентифицированы дефекты следующих типов: а) дислокации несоответствия; б) дефекты упаковки [8]. Энергетические уровни, связанные с этими дефектами, исследованы методом спектроскопии ФЛ с помощью следующих методик: анализ температурного тушения фотолюминесценции (анализ Аррениуса), который позволяет оценить энергию активации энергетических уровней дефектов, и анализ зависимости интенсивности ФЛ от мощности накачки, который позволяет оценить роль экситонов в излучательной рекомбинации носителей заряда с энергетических уровней дефектов различного типа.

Литература

1. T.H. Gfroerer, C.M. Crowley, C.M. Read, M.W. Wanlass, J. Appl. Phys., **111**, 093712 (2012).
2. Y. Ohizumi, T. Tsuruoka, S. Ushioda, J. Appl. Phys., **92**, 2385 (2002).
3. N. J. Quitoriano, Eugene A. Fitzgerald, J. Appl. Phys., **102**, 033511 (2007).
4. S. Plissard, C. Coionon, Y. Androussi, X. Wallart, J. Appl. Phys., **107**, 016102 (2010).
5. M.J. Joyce, M. Gal, J. Tann, J. Appl. Phys., **65**, 1377 (1989).
6. A. Raisanen, L.J. Brillson, R.S. Goldman, K.L. Kavanagh, H.H. Wieder, Appl. Phys. Lett., **64** (26), 3572 (1994).
7. K. Kitahara, M. Ozeki, A. Shibatomi, Appl. Phys. Lett., **42**, 188 (1983).
8. G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, S.S. Pushkarev, E.A. Klimov, R.M. Imamov, P.A. Buffat, B. Dwir, E.I. Suvorova, J. of Crystal Growth, **366**, 55 (2013).

ВЛИЯНИЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ОСАЖДЕННОГО МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ, НА СТРУКТУРУ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНОГО ГРАФЕНА

^{}A.V. Аврамчук¹, М.М. Михалик², М.М. Грехов¹, П.В. Борисюк¹, Ю.Ю. Лебединский¹, М.Н. Стриханов¹, Н.И. Каргин¹, В.А. Лабунов^{1,2}, И.В. Комиссаров^{1,2}*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: aavramchuck@gmail.com

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, дом 6

IMPACT OF ALUMINUM OXIDE DEPOSITED BY ALD ON STRUCTURE AND ELECTRONIC PROPERTIES OF EPITAXIAL GRAPHENE

^{}A.V. Avramchuk¹, M.M. Mikhailik², M.M. Grekhov¹, P.V. Borisjuk¹, Y.Y. Lebedinskiy¹, M.N. Strikhanov¹, N.I. Kargin¹, V.A. Labunov^{1,2}, I.V. Komissarov^{1,2}*

¹National Research Nuclear University «MEPhB»,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: aavramchuck@gmail.com

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka Street 6

In this work we study the impact of ALD deposition of 4nm thick Al₂O₃ film on epitaxial graphene/4HSiC (0001) structural and electronic properties. Atomic force microscopy studies show that Al₂O₃ does not form continuous film. The Raman spectroscopy studies do not show of any evidence of defect formation in graphene due to the Al₂O₃ deposition process. However, the 2D band position as G position dependence revealed the increase of charge carrier concentration in graphene after Al₂O₃ deposition. XPS studies allow excluding the possibility of the charge transfer scenario due to the chemical bonds forming.

В данной работе исследуется вопрос влияния на структуру и электронные свойства графена оксида алюминия нанесенного методом ALD. В эксперименте использовался коммерчески доступный эпитаксиальный графен выращенный на карбиде кремния с ориентацией 0001 и политипом 4H. Пленка оксида алюминия толщиной 4 нм осаждена на графен при 200°C из паров тетраметилалюминия (Al(CH₃)₃) и воды (H₂O), используемых в качестве прекурсоров. Морфология образцов до и после нанесения исследовалась методом атомно-силовой микроскопии. Результаты сканирования представлены на рис. 1. Поверхность исходного образца представляет собой террасы с шириной > 400 нм и высотой ступенек ~1.5 нм. Сравнение результатов сканирования образца с нанесенным оксидом алюминия с исходным образцом показывают, что Al₂O₃ не образует сплошную пленку на поверхности графена. Влияние осаждения оксида

алюминия на структуру и электронные свойства графена исследовалось методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Анализ спектров КРС до и после нанесения оксида алюминия (рис. 2а, б) показывает отсутствие изменения спектра в области $1300\div 1400\text{ см}^{-1}$ соответствующий D полосе, что указывает на то, что осаждение Al_2O_3 не приводит, по крайней мере к существенному, изменению дефектности графена. Тем не менее, анализ зависимостей позиции линий 2D от позиции линий G показал значительное изменение (рис. 2в), что в соответствии с работой [1] указывает на значительное увеличение концентрации носителей заряда в графене после нанесения Al_2O_3 . Для изучения вопроса возможности переноса заряда обусловленного образованием химических связей графена в ходе нанесения оксида алюминия, были проведены исследования образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Сравнительный анализ спектров РФЭС показал отсутствие дополнительных компонент в линии C1s спектра образца с нанесенным оксидом алюминия по сравнению с исходным образцом.



Рис. 1. АСМ изображение поверхности а) исходного образца графен/SiC; б) оксида алюминия на графен/SiC

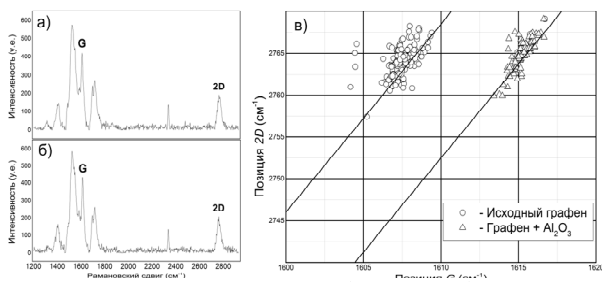


Рис. 2. Типичные спектры КРС а) исходного графена и б) графена с осажденным оксидом алюминием; в) Зависимость позиции линий 2D от позиции линии G

Литература

1. J.E. Lee, G. Ahn et al., Nature Communications, 3(1024) (2012).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГРАФИТИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК
3C-SiC/Si ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОТЖИГЕ**

**А.В. Аврамчук^{1,1}, М.М. Михалик², К.А. Нигерши², В.Ю. Фоминский¹, Р.И. Романов¹,
А.О. Султанов¹, А.С. Гусев¹, В.А. Лабунюв^{1,2}, И.В. Комиссаров^{1,2},
М.Н. Стриханов¹, Н.И. Каргин¹*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: aavramchuck@gmail.com

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, дом 6

**GRAPHITIZATION PROCESS STUDY OF 3C-SiC/Si FILM SURFACE TREATED WITH
PULSED LASER RADIATION**

**A.V. Avramchuk^{1,2}, M.M. Mikhailik², K.A. Nigirish², V.Yu. Fominski¹, R.I. Romanov¹,
A.O. Sultanov¹, A.S. Gusev¹, V.A. Labunov^{1,2}, I.V. Komissarov^{1,2}, M.N. Strikhanov¹, N.I. Kargin¹*

¹National Research Nuclear University MEPHI

Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: aavramchuck@gmail.com

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka Street 6

In this work, we try to suite an approach, which concerns of epitaxial graphene growth by laser irradiation of 3C-SiC (111) film deposited on silicon substrate (111) by chemical vapor deposition method. Laser treatment was performed by pulsed 266 nm and 1064 nm laser with 20 Hz repetition rate and 15 ns pulse duration, the fluency was varied in the 290 to 520 mJ/cm² range (266 nm) and 0.5÷1.5 J/cm² (1064 nm). Raman spectroscopy studies show that at some conditions D and G bands start to be observable in the spectra samples treated with 266 nm laser. Moreover, 2D band is noticeable for samples treated with 1064 nm laser revealing high crystallographic quality of graphitic (graphene) film.

В работе исследовался процесс графитизации поверхности во время эпитаксиального синтеза графена на подложках 3C-SiC/Si(111) методом локального лазерного отжига. Гетероэпитаксиальные слои кубического карбида кремния получены методом CVD из газовой смеси SiH₄ и C₂H₄, с различным составом газовой смеси (Si/C = 0.5; 0.7) на подложках кремния ориентации (111). Локальный отжиг проводился лазером ИАГ:Nd+ с длиной волны 266 нм и 1064 нм, частотой повторения импульсов 20 Гц и длительностью 15 нс, плотность энергии варьировалась от 290 до 520 мДж/см² для излучения с длиной волны 266 нм и от 0.5÷1.5 Дж/см² для лазера с длиной волны 1064 нм. Сравнение спектров комбинационного рассеяния света (КРС) образцов 3C-SiC с Si/C = 0.5, прошедших обра-

ботку с исходными показывает, что при определённых условиях лазерного отжига наблюдаются изменения D и G полос спектров КРС (рис. 1), однако при тех же условиях эксперимента для образцов Si/C = 0.7 изменений в спектрах КРС не наблюдается.

Анализ спектров образцов с Si/C = 0.5, подвергавшихся лазерному воздействию с длиной волны 1064 нм, как и в первом случае показывает незначительные изменения в спектре в области 1300÷1400 см⁻¹ соответствующей D и G полосе; для образцов с соотношением фазы Si/C = 0.7 мы наблюдаем изменения как в области D и G полос, так и в области 2700÷2800 см⁻¹, соответствующей 2D полосе (рис. 2), что указывает на образование графенового слоя. Тем не менее, 2D пик графена на карбиде кремния слегка смещен, по сравнению с тем же пиком, наблюдаемым в графене, получаемом на медной подложке (~ 2700 см⁻¹). Полуширина ~ 30 см⁻¹, что является типичным для турбостатического графена. С другой стороны большая дефектность должна приводить к расширению пика 2D, однако в нашем случае пик достаточно узкий. Возможно, данная картина наблюдается за счет неоднородности по дефектности слоя по глубине.

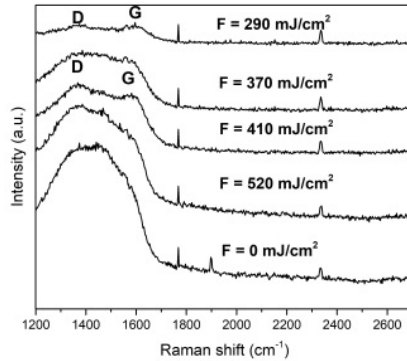


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света (длина волны возбуждения 473 нм) образцов 3C-SiC/Si с Si/C = 0.5, подвергавшихся лазерному облучению с длиной волны 266 нм, где F – плотность энергии

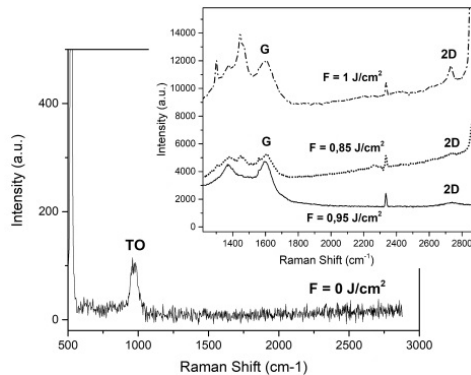


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния света (длина волны возбуждения 473 нм) образцов 3C-SiC/Si с Si/C = 0.7, подвергавшихся лазерному облучению с длиной волны 1064 нм, где F – плотность энергии

**МОНИТОРИНГ СТЕПЕНИ ЛЕГИРОВАНИЯ ГРАФЕНА
МЕТОДОМ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**М.М. Михалик¹, Н.Г. Ковальчук¹, К.А. Нигерिश¹, Н.И. Каргин², И.В. Комиссаров^{1,2},
С.Л. Прищепа^{1,2}*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, дом 6, e-mail: mymikhalik@gmail.com

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31.

THE MONITORING OF GRAPHENE DOPING LEVEL BY RAMAN SPECTROSCOPY

**M.M. Mikhalik¹, N.G. Kovalchuk¹, K.A. Nigirish¹, N.I. Kargin²,
I.V. Komissarov^{1,2}, S.L. Prischepa^{1,2}*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Republic of Belarus, 220013, Minsk, P. Brovka str. 6, e-mail: mymikhalik@gmail.com

²National Research Nuclear University MEPhI
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe highway 31.

In this work, we show the result of Raman spectroscopy study of the structure APCVD graphene grown from methane and transferred on SiO₂/Si substrate by two methods: without and with PMMA polymer. The removing of polymer was performed by thermal annealing in Ar/H₂ atmosphere with further treatment in acetone. We relate the level of the background signal in Raman spectra of graphene with amount polymer residuals on graphene substrate. Moreover, this finding is in correlation with the change in the doping level of graphene observed by the shift of the experimental data in 2DvsG band positions plot.

Исследованный в данной работе графен синтезирован методом ХПО при атмосферном давлении с использованием метана в качестве прекурсора. Измерения спектров комбинационного рассеяния света (КРС) проводились на 3D Рамановском конфокальном микроскопе Confotec NR500, при следующих условиях: длина волны лазерного излучения 473 нм, диаметр пучка ~ 600 нм. Перенос графена на поверхность SiO₂/Si осуществлялся бескаркасным способом (образец 1) и с использованием полимера (ПММА) в качестве каркаса (образец 2, 3). Удаление полимера осуществлялось путем отжига в смеси потоков аргона и водорода (100 и 60 см³/мин) при температуре 300 °С в течение 120 мин (образец 2). После отжига образец дополнительно подвергался обработке ацетоном в течение 2.5 ч (образец 3).

На рис. 1 показаны типичные спектры КР для однослойной фракции графена, перенесённого на поверхность SiO₂/Si для каждого из образцов.

Согласно [1], дополнительный подъём, наблюдаемый в диапазоне $1200 \div 1700 \text{ см}^{-1}$, связан с наличием органических соединений на поверхности графена, образовавшихся после развала полимера.

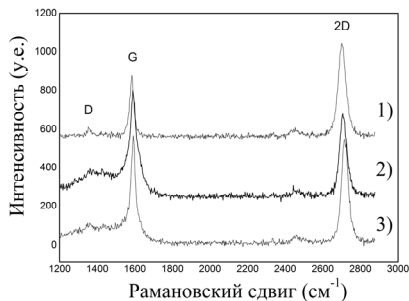


Рис. 1. Спектры КРС однослойных фракций графена, перенесенного на поверхность SiO_2/Si , нумеруемых по образцам соответственно 1), 2), 3)

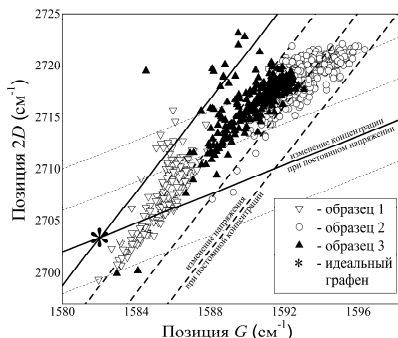


Рис. 2. Экспериментальные данные положения линий спектров КРС

На рис. 2 представлены экспериментальные данные положения линий 2D как функции положения линий G. Экспериментальные данные для каждого образца довольно хорошо распределены вдоль прямых, с тангенсом наклона 2.25, что соответствует двусосному напряжению в однослойном графене [2]. Более того, линии, вдоль которых распределены экспериментальные данные для каждого образца, смещены друг относительно друга, что объясняется переносом заряда в системе графен-остатки полимера [3].

Литература

1. J. Hong et al., Sci. Rep., 3, 2700 (2013).
2. J. Zabel et al., Nano letters, 12, 617–621(2012).
3. J.E. Lee et al., Nature Communications, 3, 1024 (2012).

ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛОЖЕНИЙ ЛИНИЙ СПЕКТРОВ КРС ПОДВЕШЕННОГО ГРАФЕНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОТ МОЩНОСТИ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ЛАЗЕРА

**К.А. Нигерिश¹, Н.Г. Ковальчук¹, М.М. Михалик¹, О.В. Королит², М.С. Тиванов²,
А.А. Елисеев³, Н.И. Каргин⁴, И.В. Комиссаров^{1,4}*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, дом 6, e-mail: Nigerish.95@mail.ru

²Белорусский государственный университет
Беларусь, 220030, г. Минск, проспект Независимости, дом 2;

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские Горы, дом 1, строение 73;

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31.

THE EXPERIMENTAL STUDY OF SUSPENDED GRAPHENE RAMAN LINES POSITIONS DEPENDENCE ON TEMPERATURE AND EXCITATION LASER POWER

**К.А. Nigerish¹, N.G. Kovalchuk¹, M.M. Mikhailik¹, O.V. Korolik², M.S. Tivanov², A.A. Eliseev³,
N.I. Kargin⁴, I.V. Komissarov^{1,4}*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Republic of Belarus, 220013, Minsk, P. Brovka str. 6, e-mail: Nigerish.95@mail.ru

²Belarusian State University
Republic of Belarus, 220030, Minsk, Independence Avenue 2;

³Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991, Moscow, Leninskiye Gory 1-73;

⁴National Research Nuclear University MEPhI
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe highway 31.

In this work, we present the experimental study of suspended graphene Raman lines positions dependence on temperature and excitation laser power. Twisted graphene was grown by CVD method [1] and suspended over copper grid with 100 μm holes. The linear approximation slopes of power dependence for G and 2D bands are -2.26 and $-3.05 \text{ cm}^{-1}/\text{mW}$, respectively. The slopes for temperature dependences are -0.007 and $-0.014 \text{ cm}^{-1}/\text{K}$, for G and 2D bands respectively. Based on model developed in [2] we obtained the thermal conductivity value of studied graphene in the range of $333 \div 501 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Исследования спектров комбинационного рассеяния света (КРС) графена, синтезированного методом ХПО при атмосферном давлении и перенесенного на медную сетку, содержащую сквозные отверстия диаметром 100 мкм, были проведены в вакууме ($<5 \cdot 10^{-4}$ Па) с использованием конфокального Рамановского спектрометра Nanofinder HE (LOTIS TII), с длиной волны лазера 473 нм и диаметром пучка 0.6 мкм. Зависимости положения G и 2D линий спектра графена от мощности возбуждающего

лазера измерялись при температуре 23 К. Лазерный луч фокусировался в центре подвешенной пленки. Полученные зависимости представлены на рис. 1.

Температурная зависимость позиций пиков КРС спектров (рис. 2) регистрировалась в диапазоне – от 23.2 до 290 К, точность установления температуры 0.05 К, мощность возбуждающего лазера 1.2 мВт.

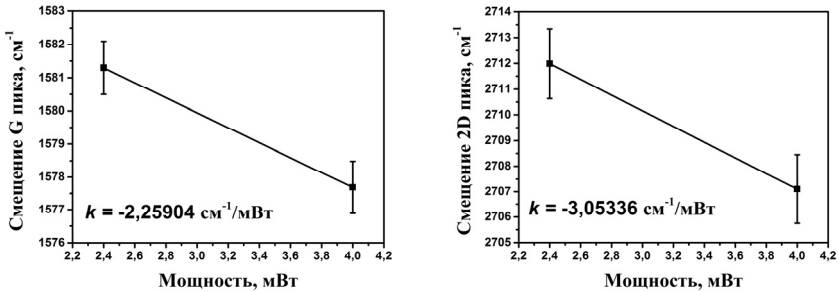


Рис. 1. Зависимость положений пиков КРС графена от мощности возбуждающего лазера

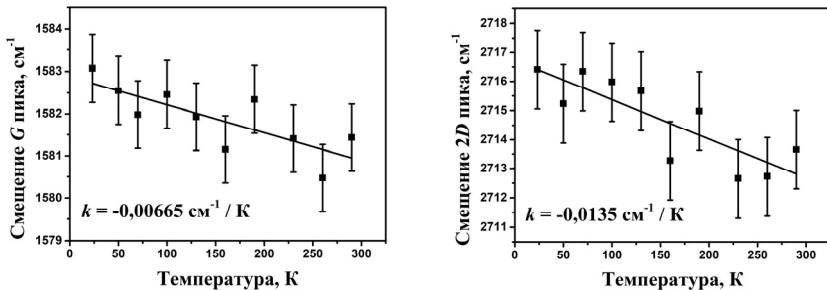


Рис. 2. Температурная зависимость положений пиков спектров КРС подвешенного графена

Используя теоретическую модель расчета, описанную в [2], было получено значение теплопроводности 333 и 501 Вт·м⁻¹·К⁻¹ для G и 2D полосы, соответственно. Следует отметить, что в используемой модели расчета не учитывается зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

Литература

1. I.V. Komissarov et al., Beilstein journal of nanotechnology, **8** (2017).
2. C. Faugeras et al., ACS nano, **4**, 4 (2010).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ОКСИДА ИНДИЯ-ОЛОВА**

**М.С. Бурдыкин, Р.В. Захарченко, С.А. Шостаченко, Ю.А. Порохонько*

Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: MSBurdykin@mephi.ru

**RESEARCH OF OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF THE
TRANSPARENT CONDUCTING FILMS BASED ON INDIUM TIN OXIDE**

**M.S. Burdykin, R.V. Zakharchenko, S.A. Shostachenko, Y.A. Porokhonko*

National Research Nuclear University MEPHI
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: MSBurdykin@mephi.ru

The optical and electrophysical properties of transparent conductive films based on indium tin oxide were investigated in this paper. Indium tin oxide (ITO) is one of the most widely used transparent conductive materials due to its basic properties: high electrical conductivity, optical transparency, the ability to reflect IR radiation and the relative ease of its production.

The magnetron sputtering method was used for ITO films production. Researched samples were annealed in air and nitrogen atmosphere. The structure and quantitative composition of the films were studied. The relative transmission spectra were also studied.

В ходе данной работы были исследованы оптические и электрофизические свойства прозрачных проводящих пленок на основе оксида индия-олова. Оксид индия-олова (ИТО) является одним из наиболее широко используемых прозрачных проводящих материалов из-за его основных свойств: высокой электропроводности, оптической прозрачности, способности отражать ИК излучение и относительной простоты его получения.

Для получения пленок ИТО использовался метод магнетронного распыления. Исследуемые образцы подвергались отжигу в атмосферах воздуха и азота. Была изучена структура и количественный состав полученных пленок. Также были исследованы спектры относительного светопропускания.

По результатам работы было установлено, что термический отжиг в определенном диапазоне температур приводит к падению значений поверхностного сопротивления пленок (рис.1). Однако отжиг в азоте приводит к более существенному снижению сопротивления и более низким конечным его значениям. С помощью полученных зависимостей, путем вы-

бора температуры отжига, можно получить пленки с необходимым значением поверхностного сопротивления.

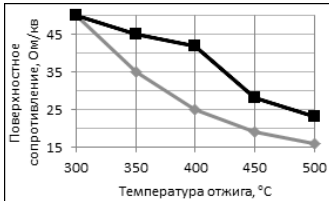


Рис. 1. Зависимости поверхностного сопротивления пленок от температуры отжига в атмосферах воздуха и азота (черная и серая линии соответственно)

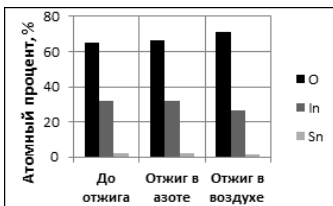


Рис. 2. Состав пленок в атомных процентах

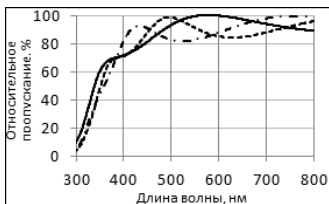


Рис. 3. Спектры относительного светопропускания для пленок толщиной 50, 75 и 110 нм (сплошная, пунктирная и штрихпунктирная линии, соответственно)

После исследования образцов с помощью метода рентгеновской дифрактометрии было установлено, что уменьшение сопротивления после отжига связано с кристаллизацией пленок. Отличия значений поверхностного сопротивления в разных атмосферах отжига связаны с различным составом, в частности с процентным соотношением кислорода в пленках (рис.2).

Также были получены спектры относительного пропускания для пленок различных толщин (рис.3). После отжига прозрачность пленок увеличивалась в среднем на 7% во всем диапазоне длин волн. Атмосфера отжига не оказывает значительного влияния на спектры пропускания.

Воспользовавшись этими данными, с помощью подбора толщины пленки, можно добиться значений относительного светопропускания порядка 95÷99% для конкретной длины волны. Данное поведение спектров связано с тем, что для подобных тонких диэлектрических и полупроводниковых пленок при падении на них света характерны интерференционные явления.

**ЭФФЕКТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ДИФФУЗИИ БОРА
В КРЕМНИЙ ИЗ ТВЕРДЫХ ПЛАНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

^{}Н.А. Торхов^{1,2}, А.В. Макаров¹, Л.М. Ромас¹, Н.Г. Гарбер¹, И.Д. Филимонова¹,
В.А. Новиков²*

¹Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов
Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А, e-mail: trkf@mail.ru
²Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

**SELF-ORGANIZATION EFFECTS IN THE PROCESS
OF BORON IN SILICON DIFFUSION FROM SOLID PLANAR SOURCE**

^{}N.A. Torkhov^{1,2}, A.V. Makarov¹, L.M. Romas¹, N.G. Garber¹, I.D. Filimonova¹, V.A. Novikov²*

¹Scientific- Research Institute of Semiconductors
99A, Krasnoarmeiskaya Str., Tomsk, 634034, Russia, tel.: 83822-288122, e-mail: trkf@mail.ru
²Tomsk State University, 36, Lenina Av., Tomsk, Russia, 634050

Physical limits for uniformity of distribution of electrically active boron B acceptor dopant in silicon Si(111) are determined by self-organization effects in the processes of its diffusion.

Для исследования эффектов самоорганизации [1] в процессах диффузии на поверхности эпитаксиального n-Si(111) в окнах SiO₂ формировались круглые p-n-переходы диаметрами $D = 5, 15, 30, 50, 100, 200$ и 500 мкм с использованием одностадийного (когда процесс диффузии бора в кремний происходит одновременно с формированием на его поверхности боросиликатного стекла) и двухстадийного (когда процесс диффузии бора в кремний осуществляется после формирования на его поверхности слоя боросиликатного стекла) процессов диффузии бора В в кремний при температуре $T=1100$ °С из твердого планарного источника нитрида бора BN [2].

Анализ числовых последовательностей измеренных значений удельных емкостей $C^* = C/S$ (C – емкость, S – площадь перехода) показал, что значения C^* для одностадийного процесса диффузии при уменьшении диаметров p-n-переходов начиная с $D = 50$ мкм увеличиваются значительно сильнее, чем для двухстадийного (рис. 1). Исследования размерностей процессов с использованием понятий меры, размерности, метрических и функциональных (линейных) пространств, позволяющих с единых позиций рассматривать скалярные величины, непрерывные функции и числовые последовательности [3] показали, что для диаметров $D \geq 50$ мкм значения фрактальных размерностей D_f практически совпадают с топологической размерностью D_T плоской поверхности $D_f = D_T = 2$. Превышающие

2.5 значения D_f указывают на то, что для р-п – переходов диаметрами $D \ll 50$ мкм присущи не только двухмерные свойства, но и трехмерные. Данный факт обусловлен неоднородностью диффузионного фронта в пространстве, что хорошо отражается на неоднородностях емкостных контрастов р-п-переходов (рис. 2). Одностадийный процесс диффузии (рис. 2,а) характеризуется меньшей однородностью, чем двухстадийный (рис. 2,б).

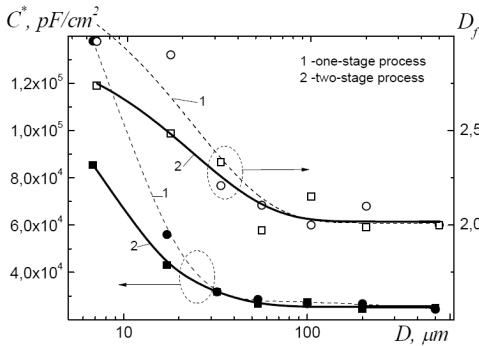


Рис. 1. Зависимости значений удельной емкости C^* и фрактальной размерности D_f от линейных размеров D р-п – переходов для одностадийного (1- one-stage) и двухстадийного (2- two-stage) процессов диффузии бора В в n-Si(111)

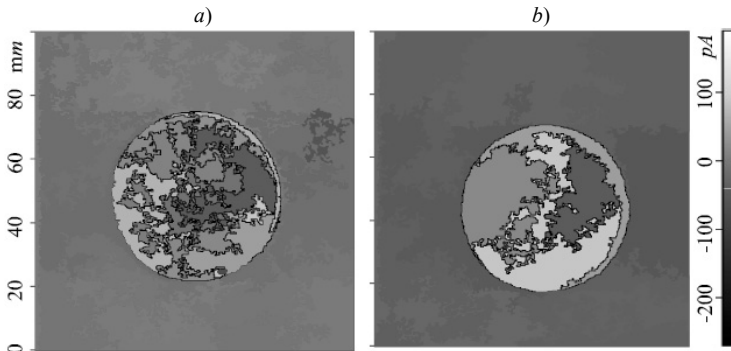


Рис. 2. Полученные АСМ методом контурные изображения емкостных контрастов p^+ -областей Si(111) диаметром 50 мкм: полученных в результате одностадийного – а) и двухстадийного – б) процессов диффузии бора в n-Si(111) при $T=1100$ °С

Литература

1. Е. Федер. Фракталы. М.: Мир (1991).
2. В.И. Диковский, Н.В. Смирнова, Д.А.Евстигнеев, Способ диффузии бора в кремниевые пластины. Патент 2183365, заявка 2000132835/28 от 10.06.2002.
3. И.А. Иванिशко, В.Г. Кротов, Компактность вложений соболевского типа на метрических пространствах с мерой, Мат. заметки, **86**(6), 829–844 (2009).

**ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ
КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ
РЕЗОНАНСНО-ФОНОННОГО ДИЗАЙНА**

**Р.А. Хабибуллин¹, Н.В. Щаврук¹, Д.С. Пономарев¹, Д.В. Ушаков², А.А. Афоненко²,
О.Ю. Волков³, В.В. Павловский³*

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, e-mail: khabibullin@isvch.ru

²Белорусский государственный университет,

Белоруссия, 220030, г. Минск, пр. Независимости, дом 4.

³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, дом 11

**TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE OUTPUT POWER OF TERAHERTZ
QUANTUM CASCADE LASERS BASED ON RESONANCE-PHONON DESIGN**

**R.A. Khabibullin¹, N.V. Shchavruk¹, D.S. Ponomarev¹, D.V. Ushakov², A.A. Afonenko²,
O.Yu. Volkov³, V.V. Pavlovskiy³*

¹Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 123456, Moscow, Nagornij proezd 7, e-mail: khabibullin@isvch.ru

²Belarusian State University,

Belarus, 220030, Minsk, Nezavisimosti prospect, 4.

³Institute of radio-engineering and electronics of RAS,
Russia, 125009, Moscow, Mokhovaya str., 11

We have designed and fabricated terahertz quantum cascade lasers (THz QCL) based on GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As three and four-quantum well active module with resonant-phonon depopulation scheme. Three-well and four-well THz QCLs have a lasing frequencies of 3.2 and 2.3 THz, respectively. We investigate the dependence of threshold current and lasing output power on temperature. The investigation of temperature degradation in THz QCLs shows that the thermally activated longitudinal optical-phonon scattering is the dominant mechanism.

В работе предложены конструкции активной области квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона частот (ТГц ККЛ) на основе трех и четырех туннельно-связанных квантовых ям GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As с использованием резонансного туннелирования в качестве механизма накачки верхнего лазерного уровня и резонансного испускания продольного оптического фонона (ЛО-фонона) в качестве механизма опустошения нижнего лазерного уровня. На рис. 1 приведен пример спектра усиления структуры, рассчитанной под 3.2 ТГц.

На основе предложенных конструкций изготовлены ТГц ККЛ с Au-Au двойным металлическим волноводом. Проведено исследование влияния

температуры на пороговый ток и выходную мощность изготовленных ТГц ККЛ (рис. 2 и 3), излучающих в областях 3.2 и 2.3 ТГц с максимальной рабочей температурой $T_{\max} \sim 100$ К. Из графика Аррениуса выходной мощности от температуры (рис. 4) определена характеристическая энергия активации, которая необходима для стимулированной рекомбинации электронов с верхнего на нижний лазерные уровни за счет испускания ЛО-фононов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-02-00070 А.

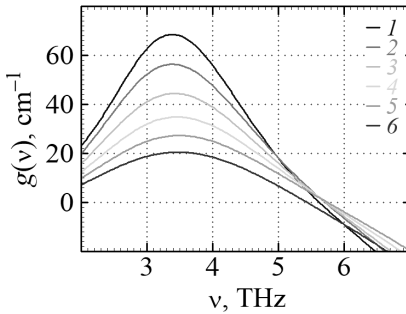


Рис. 1. Спектры усиления при напряженности электрического поля $E=12.3$ кВ/см для конструкции активной области под 3.2 ТГц. Кривые с номерами 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют температурам $T = 50, 100, 150, 200, 250, 300$ К, соответственно

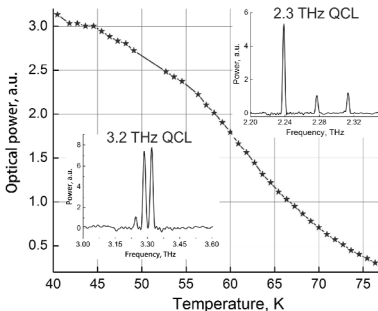


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от температуры для 3.2 ТГц ККЛ. На вставках приведены спектры излучения 2.3 и 3.2 ТГц

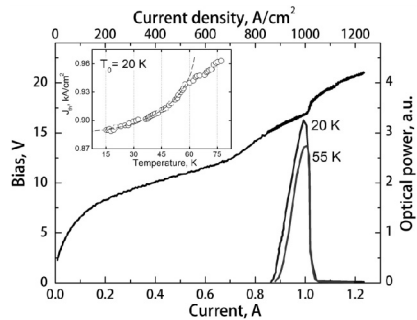


Рис. 2. Измеренные ВАХ и токовая зависимость интегральной интенсивности излучения для 3.2 ТГц ККЛ. На вставке приведена зависимость порогового тока от температуры

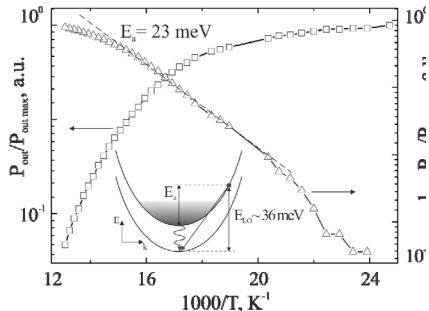


Рис. 4. График Аррениуса выходной мощности от температуры для 3.2 ТГц ККЛ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА С ДВОЙНЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ НА ОСНОВЕ СЕРЕБРА

**Н.В. Шаврук¹, Р.А. Хабибуллин¹, А.А. Зайцев², В.Г. Бабкин³*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук
Россия, 142432, г. Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5, e-mail: kolq@mail.ru

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

³ГК «Остек» 121467, Россия, Москва, ул. Молдавская, д. 5, стр. 2

FABRICATION OF TERAHERTZ QUANTUM CASCADE LASER WITH DOUBLE METAL WAVEGUIDE BASED ON SILVER

**N.V. Shchavruk¹, R.A. Khabibullin¹, A.A. Zaytsev², V.G. Babkin³*

¹Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics Russian Academy of Sciences Russia,
142432, Moscow, Nagornyy Proezd, 7, p. 5, e-mail: kolq@mail.ru

²National Research University of Electronic Technology.

Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina sq, 1

³Ostec Group, 121467, Russia, Moscow, Moldavskaya str., 5/2

Thermocompression bonding of quantum-cascade lasers has a decisive influence on the yield of useful QCLs – defectiveness in bonding can reach 40%. So, the quality of bonding affects both welded metals and process parameters – mainly temperature and pressure. The most promising metals for double waveguides, copper and silver, have some peculiarities and difficulties in carrying out the thermal-compression bonding process.

В современных квантово-каскадных лазерах терагерцового диапазона частот (ТГц ККЛ) наиболее эффективно “работает” двойной металлический волновод (ДМВ), когда активная область лазера заключена между двумя металлическими слоями [1]. ДМВ обеспечивает высокое модовое ограничение (фактор перекрытия волноводной моды с активной областью лазера $\Gamma \approx 1$) и меньшие потери по сравнению с плазмонным волноводом. Ранее нами был изготовлен ТГц ККЛ с ДМВ на основе золота [2]. Одним из перспективных металлов для ТГц волноводов является серебро. В работе [3] были продемонстрированы ТГц ККЛ с улучшенными характеристиками за счет использования поверхностного плазмонного волновода с серебром в качестве “верхнего” металла. Целью данной работы является разработка постростовой обработки гетероструктуры для создания ТГц ККЛ с ДМВ на основе серебра.

Наибольшую сложность при создании ТГц ККЛ с ДМВ на основе серебра является процесс термокомпрессионного соединения гетероструктуры с активной областью и n+-GaAs подложки. Для контроля дефектности Ag-термокомпрессионного соединения мы использовали методы ультразвукового исследования качества соединения “гетероструктура ККЛ–Ag–n+-GaAs”. На рис. 1 представлен характерный снимок, полученный на ультразвуковом микроскопе, термокомпрессионного соединения, где более светлая область – полость между ККЛ и n+-GaAs. На рис. 2 представлен снимок РЭМ скола лазерного полоска с Ag-ДМВ, на котором виден подтрав серебра верхнего металла после ICP-RIE травления.

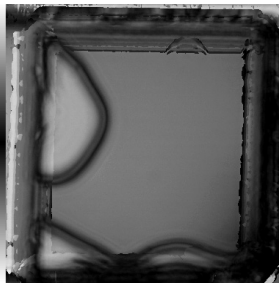


Рис. 1. Характерный вид снимка УЗВ микроскопа

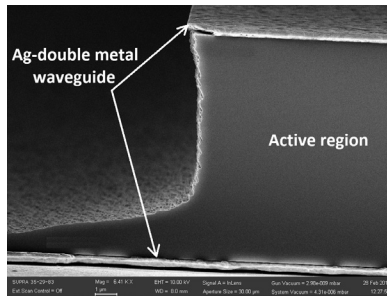


Рис. 2. РЭМ-снимок скола лазерного полоска с ДМВ на основе серебра

В таблице указаны слои металлов и параметры процесса, которые были использованы для термокомпрессионного соединения, а также процент соединенной площади ККЛ и n+-GaAs.

Таблица

Параметры процесса термокомпрессионного соединения и соединенной площади

Материал, толщина нм	Т сварки, °С	Р, МПа	Соединенная площадь, %
Au/Pd/ Ti 470/30/30	330	1.6	67÷65.5
Cu/Ta 300/15	350	1.6	58.9
Cu/Ta 300/15	400	1.75	68.6
Cu/Ta 300/15	400	2.95	80.8
Ag/Ti 1000/30	300	6.17	63.95
Ag/Ti 1000/30	300	10.2	95.5

Литература

1. B.S. Williams. Terahertz quantum-cascade laser, Nature Photonics, **1**, 517 (2007).
2. Р.А. Хабибуллин, Н.В. Щаврук и др., ФТП, **50**(10), 1395 (2016).
3. Y.J. Han, L.H. Li, J. Zhu et al., Opt. Express, **26**(4), 3814 (2018).

**ДВУХБАРЬЕРНЫЕ GaAs/AlAs ТЕРАГЕРЦОВЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ В РЕЖИМЕ
ДЕТЕКТИРОВАНИЯ С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ**

*А.А. Алексанян¹, А.Л. Карузский¹, Ю.А. Митягин¹, В.Н. Мурзин¹, А.В. Пересторонин¹,
А.М. Цховребов¹, А.П. Черняев²*

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр. 53, e-mail: karuz@sci.lebedev.ru

²Московский физико-технический институт (ГУ)
Россия, 141700, Долгопрудный МО, Институтский пер. 9

**TERAHERTZ GaAs/AlAs DOUBLE BARRIER NANOSTRUCTURES IN THE
RECTIFICATION MODE WITH INTERNAL AMPLIFICATION**

*A.A. Aleksanyan¹, A.L. Karuzskii¹, Yu.A. Mityagin¹, V.N. Murzin¹, A.V. Perestoronin¹,
A.M. Tshovrebov¹, A.P. Chernyaev²*

¹P.N. Lebedev Physical Institute of RAS
Russia, 119991 Moscow, Leninsky pr. 53, e-mail: karuz@sci.lebedev.ru

²Institute of Physics and Technology (State University)
Russia, 141700 Moscow District, Dolgoprudny, Institutsky per. 9

We have studied the periodical-in-voltage oscillations in the current-voltage characteristics of GaAs/AlAs double barrier resonant tunneling diode terahertz detectors. The found oscillations of the negative differential conductance are attributed to LO-phonon-branch polariton excitations stimulated by electrons tunneling through the quantum active region in the resonance nanostructure. The RTD serves as an internal amplifier of weak electromagnetic signals, provided by the region of negative differential conductance.

Периодические особенности участка отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) ВАХ в GaAs/AlAs терагерцовых резонансно-туннельных диодах (РТД) [1-3] (рис. 1, без СВЧ), обусловленные вынужденными возбуждениями LO-фононной ветви поляритонов, указывают на высокое быстродействие ($\geq 10^{13}$ Гц), характерное для туннельной, не металлического типа проводимости в нелегированной области квантовых слоёв РТД. Большое внутреннее усиление, многообразие функциональных возможностей за счёт наличия области ОДП позволяют рассматривать детекторы на основе полупроводниковых РТД наноструктур в качестве альтернативы современным быстродействующим приёмникам и сверхчувствительным датчикам физических величин (см. ссылки в [3]). Детектирование внешнего СВЧ поля за счёт изменений постоянной составляющей тока РТД, т. е. изменений ВАХ РТД, не могут быть объяснены обычным квадратичным детектированием, пропорциональным кривизне ВАХ в

виде $(\partial^2 I / \partial U^2)$. За счёт внутреннего усиления вторым существенным параметром становится изменение мощности колебаний [4]. Процесс детектирования на участке ОДП характеризуется чувствительностью $(\partial^2 I / \partial U^2) / (\partial I / \partial U)$ в единицах А/Вт, в котором изменение тока $I(u(t))$ и СВЧ-мощности $I(u(t)) \cdot u(t)$ после разложения функции тока $I(u(t))$ в ряд Тейлора в точке U_0 для переменной составляющей $u(t) = U_0 \cos \omega t$ дадут за счёт квадратичных членов $\sim \cos^2 \omega t$ постоянный вклад в изменение ВАХ $\sim (\partial^2 I / \partial U^2) / (\partial I / \partial U)$. Знаменатель $\partial I / \partial U$ учитывает изменение знака приращения тока в изменениях ВАХ и появление особенностей разрывного типа за счёт внутреннего усиления на участке ОДП (рис. 1, с СВЧ).

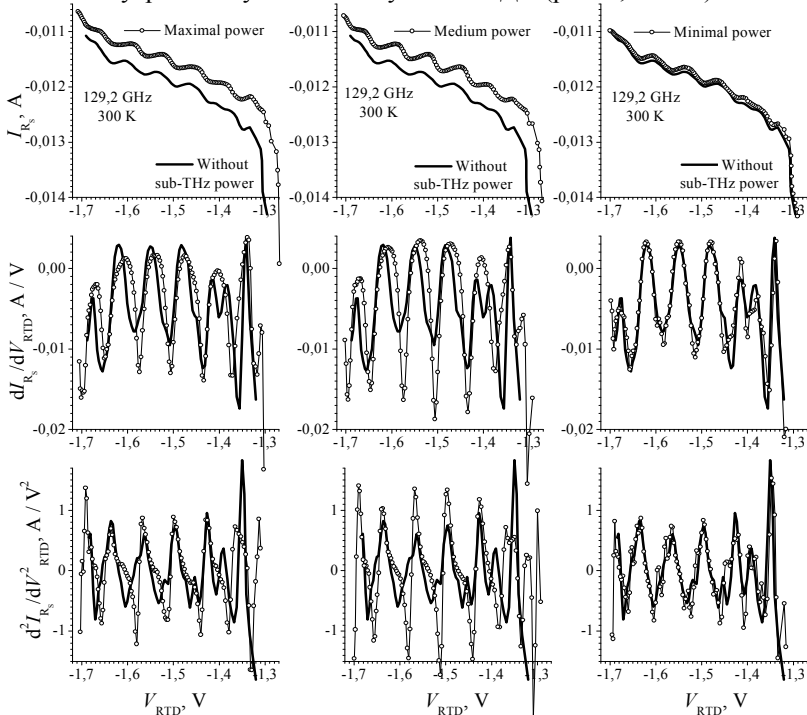


Рис. 1. ВАХ, её первая и вторая производные для РТД при наличии и в отсутствие СВЧ

Литература

1. А.А. Алексанян и др., Вестник НИЯУ “МИФИ”, 3 (6), 671 (2014).
2. А.А. Aleksanyan et al., Proc. of SPIE, **10224**, 1022400 (2016).
3. А.А. Алексанян и др., Мокеровские чтения: сборник трудов, М.: МИФИ, 162 (2017).
4. М.А. Dresvyannikov, et al., Proc. of SPIE, **10224**, 102240N (2016).

УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ТГц-ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СПЕКТРАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ

*А.Э. Акмалов¹, Е.А. Аксенов¹, К.И. Козловский¹, *Г.Е. Котковский¹, В.В. Лучинин²,
Е.М. Максимов¹, Ю.А. Митягин¹, А.А. Плеханов¹, А.А. Чистяков¹*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: geko@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5

AN INSTALLATION FOR REGISTRATION AND RESEARCH OF THZ IMAGES WITH SPECTRAL IDENTIFICATION

*A.E. Akmalov¹, E.A. Aksenov¹, K.I. Kozlovskii¹, *G.E. Kotkovskii¹, V.V. Luchinin²,
E.M. Maksimov¹, Yu.A. Mityagin¹, A.A. Plekhanov¹, A.A. Chistyakov¹*

¹National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: geko@mail.ru

²The First Electrotechnical University "LETI"
Russia, 197376, St. Petersburg, ul. Professora Popova, 5

The paper presents the results of creating an installation for visualizing objects in reflected radiation in the range of 0.5–2.6 THz. Specific features of the reflection spectra of some organic substances are determined. Identifying of traces of organic substances on the base of visualization of objects is demonstrated.

В основе постоянно возрастающего интереса к излучению ТГц диапазона лежит возможность его применения для неразрушающего контроля, обнаружения биологических и химических агентов, в медицинской диагностике. Большинство приложений ТГц излучения делится на две группы, как правило, не связанные между собой. К первой группе относится терагерцовая спектроскопия, ко второй – получение ТГц изображений в режиме пропускания.

Целью настоящей работы являлось создание установки для получения изображений объектов по выбору пользователя в отраженном или прошедшем излучении ТГц диапазона, с одновременной регистрацией спектров отражения (пропускания) и спектральной идентификацией объекта или его фрагментов.

Для получения ТГц излучения использованы фотопроводящие антенны (ФПА) производителя Vator на основе низкотемпературного GaAs, выполненные с применением матрицы микролинз. Возбуждение ФПА осуществлялось излучением фемтосекундного лазера с длиной волны

800 нм, частотой повторения импульсов 70 МГц и средней мощностью до 1.8 Вт.

Получение изображений объектов в отраженном от них излучении ТГц проводилось с использованием Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона и ТГц видеокамеры (рис. 1). Для изображений, полученных обратным преобразованием Фурье над интерферограммами, зарегистрированными видеокамерой, на основе анализа спектров отражения выбранного фрагмента изображения программным образом осуществлялась идентификация следов органических соединений, присутствующих на поверхности объекта.

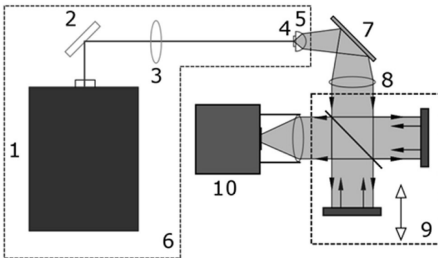


Рис. 1. Оптическая схема установки при регистрации отраженного излучения. 1 – лазер, 2 – поворотное зеркало, 3 – линза, 4 – фотопроводящая антенна, 5 – линза, 6 – блок генерации ТГц излучения, 7 – образец, 8 – линза, 9 – спектрометр, 10 – видеокамера с объективной линзой

Определены спектральные особенности отражения излучения ТГц диапазона $0.5 \div 2.6$ ТГц, выбранными органическими веществами в окнах прозрачности атмосферы. Продемонстрирована возможность идентификации в отраженном излучении следовых количеств вещества массой $100 \div 1 \mu\text{г}$, распределенного по площади 2 см^2 .

Программная оболочка установки обеспечивает цветовую визуализацию образца в выбираемом фрагменте спектра отражения с учетом его особенностей. При смене двух элементов оптической схемы установка работает в режиме пропускания.

Обсуждается возможность создания портативного варианта установки с малым временем анализа.

**ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ
НА ОСНОВЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*С.С. Анистратенко, *Г.З. Гареев*

Научно-исследовательский Центр Безопасности Технических Систем 12 ЦНИИ МО РФ
Россия, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, дом 39,
e-mail: gazinurg@hotmail.com

REMOTE DETECTION OF EXPLOSIVES BASED ON TERAHERTZ TECHNOLOGIES

*S.S. Anistratenko, *G.Z. Gareev*

Scientific Research Center for Safety of Technical Systems 12 CNII MO RF
Russia, 197375, St. Petersburg, Novoselkovskaya Str. 39, e-mail: gazinurg@hotmail.com

The way of explosives remote detection based on laser air photonics is considered. It involves the interaction of high power femtosecond laser pulses with air. Plasma formed in gas through laser-atom/molecule interaction emits both fluorescence and acoustic waves. THz radiation enhanced emission of fluorescence and THz enhanced acoustics are two techniques that utilize two-color laser field to create air-plasma. These techniques overcome large THz wave absorption by water in air, and limited detection angles. Although monitoring optical photons gives highly sensitive detection, UV from sunlight or artificial lighting may easily saturate a sensitive photodetector such as a photomultiplier tube (PMT), making field measurements difficult. To solve this problem we propose to use visible- and solar-blind fast UV photodetectors based on wide bandgap semiconductor materials instead of PMT.

Большинство взрывчатых веществ (ВВ) имеет характерные следы (линии поглощения) в ТГц диапазоне спектра электромагнитных волн на частотах $0.5\div 3$ ТГц, обусловленные колебательно-вращательными молекулярными модами [1]. В то же время атмосфера имеет широкие полосы поглощения, обусловленные в основном молекулами воды. Поэтому в полевых условиях чисто ТГц системы зондирования могут работать на коротких расстояниях. Для дистанционного зондирования ВВ необходимо использовать комбинированные оптико-терагерцовые методы с применением мощных фемтосекундных лазеров [2]. В дальней системе зондирования используется 4-х волновое микширование – генерация двух гармоник мощного импульсного ближнего ИК лазера, которые ионизируют воздух вблизи зондируемого объекта и индуцируют ТГц плазменное излучение. Индуцированная лазером плазма приводит к УФ флуоресценции на длинах волн $200\div 400$ нм (линии азота). В качестве несущей использу-

ется не ТГц излучение, которое сильно поглощается в атмосфере, а УФ излучение, которое распространяется в атмосфере на расстояния до нескольких километров. Отраженное от зондируемого объекта ТГц излучение модулирует (усиливает амплитуду) УФ флуоресценцию. Для детектирования УФ излучения вместо фотоэлектронного умножителя, который быстро насыщается при солнечной засветке или искусственном освещении, можно использовать видимо- или солнечно-слепые УФ высокочувствительные быстродействующие фотоприемники на основе широкозонных материалов (SiC, GaAlN, ZnMgO) [3]. Альтернативным вариантом дистанционного зондирования ВВ является метод ТГц усиленного акустического сигнала [4]. Лазерно-индуцированная плазма создает звуковой сигнал, поскольку газ ионизируется на частоте лазерных импульсов. Хотя основной компонент звука определяется частотой повторения импульсов (порядка кГц), очень широкий спектр с высокими гармониками излучается при каждом хлопке. Когда ТГц импульс попадает на плазму, электроны ускоряются в ТГц поле, что приводит к росту столкновений и температуры газа, и, следовательно, давления. ТГц волны могут прослушиваться с помощью микрофона. Таким образом, ТГц спектроскопические следы ВВ могут детектироваться оператором посредством УФ флуоресценции (200÷400 нм) или звуковых волн (20 Гц ÷ 140 кГц) на значительных расстояниях ввиду атмосферной прозрачности. Достоинства дистанционной лазерной системы зондирования ВВ: эмиттером и приемником ТГц служит окружающий воздух, амплитуда электрического поля достигает МВ/см, широкополосное излучение (до 100 ТГц), нет проблемы фоновонного поглощения. Недостатки: необходимость мощного фемтосекундного лазера, низкая эффективность оптико-терагерцового преобразования (нелинейная восприимчивость 3-го порядка), сложность точной фокусировки и контроля амплитуды и фазы на дальнем расстоянии, опасность для глаз мощного лазерного луча.

Литература

1. Г.З. Гареев, В.В. Лучинин, Терагерцовые системы и технологии. Обзор современного состояния. Книга. Минобрнауки России. СПГЭТУ (ЛЭТИ) (2015).
2. B. Clough, J. Dai, X. Zhang, Chinese J. of Phys., **52**, No 1-II (2014).
3. A. Aldalahi et al, Nature / Scientific Reports, **6**, 23457 (2016).
4. B. Clough, J. Jiu, X.-C. Zhang, Optics Lett., **35**(21) (2010).

**АКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИК ЛАЗЕРОВ И СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

*С.С. Анистратенко, *Г.З. Гареев*

Научно-исследовательский Центр Безопасности Технических Систем 12 ЦНИИ МО РФ
Россия, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, дом 39,
e-mail: gazinurg@hotmail.com

**ACTIVE REMOTE DETECTION OF RADIONUCLIDES USING IR LASERS
AND SUBTERAHERTZ EMITTERS**

*S.S. Anistratenko, *G.Z. Gareev*

Scientific Research Center for Safety of Technical Systems 12 CNII MO RF
Russia, 197375, St. Petersburg, Novoselkovskaya Str. 39, e-mail: gazinurg@hotmail.com

The paper analyzes and evaluates the concepts for active remotely detecting the presence of radionuclides using electromagnetic signatures. The detection concepts are based on the use of laser and subTHz beams and the resulting electromagnetic signatures near the radionuclides. Free electrons, generated from ionizing radiation associated with the radionuclides, cascade down to low energies and attach to molecular oxygen. The resulting ion density depends on the level of radioactivity and can be readily photo-ionized by a low-intensity laser beam. When the air breakdown process saturates, the high power CO₂ radiation reflects off the plasma region and can be detected. The time required for this to occur is a function of the level of radioactivity. We propose to use the compact erbium doped fiber pulsed laser for photo-ionization and the fast sensitive photon drag detector.

Существуют методы и приборы прямых и непрямых измерений ионизирующих излучений. Прямые измерения являются более точными и надежными. Но они опасны для здоровья личного состава и могут привести к загрязнению приборов. Дистанционно прямыми методами можно обнаружить только высокоэнергетические нейтроны и гамма-кванты. Непрямые методы можно разделить на пассивные и активные. Пассивные методы основаны на эффекте радиолюминесценции воздушной среды вблизи радиоактивных веществ. В активных методах используются либо лазерно-индуцированная флуоресценция, либо лазерно-индуцированный пробой воздушной среды вблизи радиоактивных источников. В методе, основанном на лазерно-индуцированной флуоресценции, используется лидарная технология [1]. Можно выделить три группы методов дистанционного зондирования радионуклидов (РН), основанных на лазерно-

индуцированном пробое: 1) субТГц [2, 3], 2) 2-х лучевые лазерные (ИК) [4], 3) комбинированные лазерно-субТГц [5]. Мы разработали оперативный и безопасный метод дистанционного обнаружения радионуклидов в полевых условиях на основе двухлучевого лазерно-индуцированного пробоя воздуха. В качестве фото-ионизирующего лазера предлагается использовать компактный волоконный эрбиевый лазер на длине волны 1.55 мкм. Его преимущества по сравнению с лазером Nd:YAG на 1.06 мкм: компактность и меньшее энергопотребление, безопасная для глаз длина волны, меньшая вероятность мультифотонной ионизации, возможность использования гибких волоконных волноводов. Для лавинного пробоя воздуха предлагается использовать мощный импульсный CO₂ – лазер на длине волны 10.6 мкм. Для детектирования лазерного луча (10.6 мкм), отраженного от ионизированной области, предлагается использовать компактный безынерционный ИК фотоприемник на основе эффекта фотонного увлечения, не требующий охлаждения. Если сравнивать мощные фокусирующие лазеры (создающие лавинный пробой) Nd:YAG (1.06 мкм) и CO₂ (10.6 мкм), то первый имеет преимущество с точки зрения направленности излучения (дифракционная расходимость), в то время как пороговая мощность (пропорциональна квадрату частоты) второго на два порядка ниже (соответственно, примерно 10¹¹ и 10⁹ Вт/см²). Когда электронная плотность достигает критической величины, для которой электронная плазменная частота равна лазерной частоте, лазерный луч отражается от плазмы. Отраженный луч может наблюдаться вблизи лазера и позволяет измерить общее время задержки пробоя. В предлагаемом методе детектирования время задержки формирования является сигнатурой присутствия радионуклидов. На основе измерений разницы времен образования пробоя можно оценить фактор усиления ионизации вблизи зондируемого источника и его массу.

Литература

1. R. Rosson et. al., Remote detection of radiation, US Patent US8890077B2 dd Nov. 18 (2014).
2. G.S. Nusinovich, P. Sprangle, V. E. Semenov, D.S. Dorozhkina, M.Yu. Glyavin, J. Appl. Phys., **111**, 124912 (2012).
3. D. Kim et al., **8**, 15394 (2017).
4. J. Isaacs et al., Phys. Plasmas, **23**, 033507 (2016).
5. P. Sprangle et al, Physics of Plasmas, **21**, 013103, (2014).

**ТЕРАГЕРЦЕВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН
НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЁТОЧНЫХ СТРУКТУР {LT-GAAS/GAAS:SI}**

**А.Н. Клочков¹, П.М. Солянкин^{3,2}, Е.А. Климов¹, И.С. Васильевский⁴, А.Н. Виниченко⁴,
С.С. Пушкарёв¹, П.П. Мальцев¹, А.П. Шкуринов^{2,3}, Г.Б. Галиев¹*

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5, e-mail: klochkov_alexey@mail.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет
Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: soluanpk@yandex.ru

³Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН
Россия, 140700, Шатура, Святоозерская ул., 1

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: ivasilevskii@mail.ru

**TERAHERTZ RADIATION FROM PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS BASED ON {LT-
GAAS/GAAS:SI} SUPERLATTICE STRUCTURES**

**A.N. Klochkov¹, P.M. Solyankin^{3,2}, E.A. Klimov¹, I.S. Vasil'evskii⁴, A.N. Vinichenko⁴,
S.S. Pushkarev¹, P.P. Maltsev¹, A.P. Shkurinov^{2,3}, G.B. Galiev¹*

¹Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics, RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorniy proezd 7/5, e-mail: klochkov_alexey@mail.ru

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics
Russia, 119992 Moscow, Leninskie gory, 1, e-mail: soluanpk@yandex.ru

³Institute on Laser and Information Technologies of RAS
Russia, 140700 Shatura, Moscow Region, Svyatoozerskaya st., 1

⁴National research nuclear university «MEPhI»,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: ivasilevskii@mail.ru

The dipole photoconductive antennas based on the novel superlattice {LT-GaAs/GaAs:Si} structures were obtained and investigated by means of terahertz time-domain spectroscopy. The spectra and intensity of the THz pulsed radiation under the femtosecond laser excitation of the biased photoconductive antennas were measured. We suggest optimized growth conditions of the {LT-GaAs/GaAs:Si} structures including variation of the arsenic vapor pressure between LT-GaAs and GaAs:Si layers and the post-growth anneal.

В последнее время актуальна задача повышения мощности источников импульсного широкополосного терагерцевого (ТГц) излучения, испускаемого при возбуждении фемтосекундными оптическими импульсами [1]. Недавно для фотопроводящих антенн (ФПА) были предложены [2, 3] структуры на основе низкотемпературного (LT-) GaAs, содержащие сверхрешетку (СР) {LT-GaAs/GaAs:Si}, где слои LT-GaAs выращиваются при низких температурах $T_G \leq 300$ °С, а легированные атомами кремния слои GaAs:Si – при более высоких. За счёт использования подложек GaAs

с ориентацией (111)A и выбора условий эпитаксиального роста достигалось акцепторное легирование слоев GaAs:Si, необходимое для ионизации точечных дефектов в LT-GaAs. Для получения слоев GaAs:Si p-типа необходимо низкое отношение потоков мышьяка и галлия $\gamma < 30$, неоптимальное для роста LT-GaAs слоев, поскольку не обеспечивает достаточной концентрации избыточных атомов As.

В данной работе предлагается при росте структур {LT-GaAs/GaAs:Si} одновременно с изменением T_G производить вариацию γ . Это позволяет для каждого слоя СП выбрать оптимальные условия получения. Методом МЛЭ на подложках GaAs (100) и (111)A выращены 4-периодные СП с толщиной слоев GaAs:Si – 20 нм, LT-GaAs – 230 нм. При получении образца 443 варьировались как температура подложки, так и давление мышьяка ($T_G \sim 470$ °C, $\gamma \sim 20$ для GaAs:Si, $T_G \sim 230$ °C, $\gamma \sim 60$ для LT-GaAs). Для обр. 26V использовались те же температуры роста, но постоянное $\gamma \sim 25$. ТГц импульсы генерировались дипольной ФПА при напряжении 15 В под действием излучения фемтосекундного Ti:Sapphire лазера. На рис. 1 приведен пример спектра для антенны 443 (111)A, продемонстрировавшей наиболее яркий сигнал ТГц в серии. В табл. 1 приведены амплитуды ТГц поля, по которым можно судить об относительной эффективности оптико-терагерцевой конверсии.

Таблица 1

Амплитуда ТГц импульсов

Образец	Отжиг	Амплитуда ТГц поля, произв. ед.
26V (100)	+	2.7
26V (111)A	+	29.1
443 (111)A	-	9.6
443 (111)A	+	130

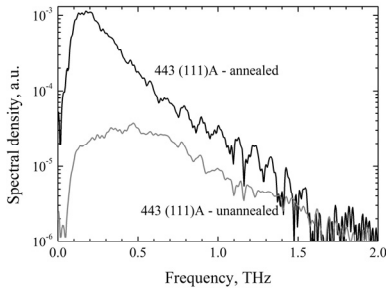


Рис. 1. Спектр ТГц излучения образца 443 до и после высокотемпературного отжига

Литература

1. A. Krotkus, J. Phys. D: Appl. Phys., **43**, 273001 (2010).
2. G.B. Galiev et al., Proc. 25th IS “Nanostructures: Physics and Technology”, Saint Petersburg, Russia 2017, 033711.
3. G.B. Galiev et al., Patent RF 2624612.
4. G.B. Galiev et al., Semiconductors **52** (3), 395 (2018).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРАГЕРЦОВЫХ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН**

**С.А. Номоев, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
e-mail: serganom@gmail.com

**SIMULATION, FABRICATION AND MEASUREMENT
OF TERAHERTZ PHOTOCONDUCTIVE ANTENNA**

**S.A. Nomoev¹, I.S. Vasilevskii, A.N. Vinichenko*

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
Kashirskoe highway31, Moscow, 115409
e-mail: serganom@gmail.com

We investigated the dependence of terahertz (THz) response power on ex-situ annealing temperature of low-temperature-grown gallium arsenide (LT-GaAs) and voltage-current characteristic. THz waves excited by femtosecond laser pulses were emitted from photoconductive antennas (flag type) formed on LT-GaAs, and the radiation power was measured with a pyroelectric detector. The THz output power of the PCA showed quadratic increase with the bias voltage. Full wave finite element method solver has been used to investigate the proposed structure's electrical and optical behavior by combining the Maxwell's wave equation with the drift-diffusion/Poisson equations.

Источники и детекторы ТГц излучения являются перспективными компонентами систем высокоскоростной беспроводной связи, медицинской и фармацевтической диагностики, дистанционного обнаружения опасных объектов. Разработка, исследование подобных источников – новое, быстроразвивающееся направление в современной оптоэлектронике.

В настоящей работе представлены результаты исследований и разработки компактной ТГц фотопроводящей антенны (ФПА) на основе гетероструктуры с низкотемпературным GaAs (LT-GaAs). Для этого в работе решались несколько задач, связанных с выбором типа источника ТГц излучения, исследованию ее вольт-амперных характеристик (ВАХ) и ватт-амперных характеристик изготовленной фотопроводящей антенны, оптимизации, как условий роста, так и топологии антенны для увеличения мощности ТГц отклика.

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали, что изготовленная на основе LT-GaAs ФПА обладает высокими характеристиками мощности излучения: ТГц-отклик мощностью 5 мкВт при

напряжении смещения 160 В и фототоке 14 мА. Показано, что изготовленная антенна обладает характеристиками, превосходящими по генерируемой мощности (в 1.5 раза) и фототоковой эффективности (в 3 раза) зарубежные аналоги. Исходя из анализа изученных литературных данных [1] по отжигу LT-GaAs и проведенных нами экспериментов [2], определены оптимальные температуры отжига (670–720 °С) LT-GaAs для генерации высокоинтенсивных ТГц-волн с использованием антенн с флажковой геометрией контактов. ФПА на основе LT-GaAs с флажковой геометрией генерируют ТГц-сигнал в спектральном диапазоне до 1 ТГц с резонансным максимумом 0.1 ТГц. ТГц антенны также были исследованы теоретически с помощью методов компьютерного моделирования и сравнение с экспериментальными результатами. На основе этих результатов были найдены подходы к повышению выходных характеристик устройств за счет оптимизации геометрической конфигурации контактов, использования плазмонных эффектов. Применялся метод конечных элементов для исследования распределения величины электрического поля в области взаимодействия оптического излучения (длина волны 800 нм) с поверхностью LT-GaAs предложенной конструкции антенны посредством решений волнового уравнения Максвелла для взаимодействия электромагнитного излучения в оптическом диапазоне и комбинированных уравнений Пуассона.

Литература

1. С.А. Номоев, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко и др., Письма в ЖТФ, **44**(2), 11-17 (2018).
2. С.А. Номоев, Научно-практический электронный журнал Аллея Науки, **13** (2017).

ЭКСТРАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ КРИСТАЛЛА ДИОДА ШОТТКИ ТГц-ДИАПАЗОНА

**Н.А. Торхов^{1,2}, Л.И. Бабак², А.А. Коколов², И.И. Петров²*

¹Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов
Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А

²Томский университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Россия, 634050, г. Томск, Ленина 40, e-mail: trkf@mail.ru

Extraction of the linear model for Schottky diode up to THz band

**N.A. Torkhov^{1,2}, L.I. Babak², A.A. Kokolov², I.I. Petrov²*

¹Scientific- Research Institute of Semiconductors
99A, Krasnoarmeiskaya Str., Tomsk, 634034, Russia, tel.: 83822-288122

²Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
Lenina st. 40, 634050, Tomsk, Russia. e-mail: trkf@mail.ru

A linear model of the planar Schottky diode with air bridge with whisker has been extracted. This model allows simulation of the Schottky diode up to THz frequency band.

Значительное отставание в частотном диапазоне полупроводниковой электроники ($f_{\text{раб}} < 2.5$ ТГц) от полупроводниковой оптоэлектроники ($f_{\text{раб}} > 10$ ТГц) обусловлено отсутствием подробных компактных моделей диодных кристаллов [1] (рис. 1). Для повышения рабочей частоты и расширения частотного диапазона диодных монолитных интегральных схем (МИС) не всегда нужно стремиться к использованию предельно достижимых топологических норм – например, минимальным диаметрам D выпрямляющих контактов. В большинстве случаев использование точных компактных моделей диодов в виде эквивалентных схем (ЭС) позволяет оптимизировать конструкцию кристалла или скомпенсировать влияние паразитных элементов его конструкции подбором определенных конструктивных элементов МИС при ее проектировании. Такой подход позволяет с максимальной эффективностью использовать потенциальные возможности барьеров Шоттки (р-п-переходов и т.п.) и повысить рабочие частоты устройств до ТГц-диапазона. В качестве примера можно привести выполненные по диодным технологиям работающие в ТГц-частотном диапазоне устройства фирмы Virginia Diodes Inc. (WR1.0AMC-S, WR1.0AMC-M и WR1.0AMC-L) [2].

Из восстановленных с использованием современных методик экстракции значений элементов уточненной эквивалентной схемы (рис. 1, б) [3] внутреннего диода видно, что емкость барьера Шоттки C_j близка к теоретическому значению емкости контакта Шоттки диаметром 1 мкм

$C_j = 0.046$ фФ при полной емкости диодного кристалла $C_{tot} = 0.021$ пФ (табл. 1). Оценка предельной частоты $f_T = 1/(2\pi R_s C_j)$ работы такого контакта Шоттки значительно превышает десятки ТГц.

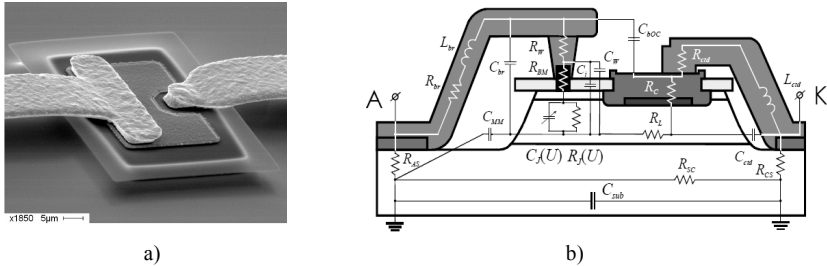


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение GaAs кристалла диода Шоттки с анодным выводом в виде воздушного моста в вискером – а) и его подробная компактная модель – б)

Результаты верификации показали достаточно хорошее совпадение модельных значений S-параметров с измеренными в контролируемом частотном диапазоне до 40 ТГц. Для верификации результатов моделирования в терагерцовом диапазоне необходимо проведение дальнейших исследований.

Таблица 1.

Внутренние элементы	Значения параметров элементов ЭС внутреннего диода							
	Смещение на аноде $U, В$							
	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	+0.2	+0.4
C_j , фФ	0.019	0.022	0.029	0.032	0.035	0.046	0.048	0.048
C_s , фФ	0.081	0.100	0.662	3.710	9.585	5.685	9.966	14.98
R_{bms} , Ом	7.787	8.470	8.515	8.950	8.923	8.914	8.431	8.391
R_l , Ом	6.459	6.046	6.100	6.001	6.501	6.175	6.005	6.981
R_c , Ом	1.972	2.000	1.700	1.000	2.011	2.035	2.094	2.999
R_s , Ом	4.048	4.126	4.071	3.928	4.356	4.274	4.131	4.558

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Уникальный идентификатор 8.4029.2017/4.6.

Литература

1. A. Jelenski, A. Grub, V. Krozer, et al., IEEE Trans. on Microwave Th. and Tech., 41(4), 4, 549-557 (1993).
2. Интегрированные источники и приемники компании “Virginia Diodes, Inc.” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vadiodes.com/en/products/compact-receiver-modules-mixatc-i>, свободный (дата обращения 02.10.2017).
3. Н.А. Торхов. Компактная модель диода с вискером терагерцового диапазона. Патент РФ № 176768, приоритет от 11.02.2016, патентообладатель АО «НИИПП» г. Томск.

**ОСОБЕННОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ
НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДОВ СВИНЦА**

**Д.В. Амасев¹, А.Г. Казанский², С.А. Козюхин³, В.Г. Михалевич¹*

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова, д. 38, 119991, Москва, тел. +7(903)5221659, e-mail: amoslegkie@gmail.com

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
ул. Ленинские горы, д.1 стр.2, 119991, Москва;

³Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,
Ленинский просп., 31, 119991, Москва.

**THE FEATURES OF PHOTOELECTRIC PROPERTIES
OF METAL-ORGANIC LEAD HALIDE PEROVSKITES**

**D.V. Amasev¹, A.G. Kazanski², S.A. Kozuykhin³, V.G. Mikhalevich¹*

¹Prokhorov General Physics Institute,
Vavilova st., 38, 119991, Moscow, ph. +7(903)5221659, e-mail: amoslegkie@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University,

Leninskie gory st., 1, build. 2, 119991, Moscow

³Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry,
Leninskiy pr, 31, 119991, Moscow

Metal-organic halide perovskites are perspective materials for photovoltaic devices. The properties of these materials suffer from external influence of humidity, air and light illumination. In this study we show the results of degradation the photoconductivity of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ and $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ perovskites. The changes in photoconductivity spectra are substantial in iodide perovskites and $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ perovskites are more stable under prolonged light illumination.

Существенной проблемой использования металлоорганических перовскитов является деградация параметров при внешних воздействиях. Понимание физических процессов в перовскитах, приводящих к деградации при внешних воздействиях, может способствовать решению этой проблемы.

В работе исследовались металлоорганические перовскиты на основе йодида ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) и бромид свинца ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$). Образцы были изготовлены путем смешивания в равных долях метиламмония и йодида (бромид) свинца в растворе диметилформамида [1]. Полученная смесь осаждалась на стеклянную подложку поверх напылённых в планарной конфигурации алюминиевых контактов. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Было исследовано влияние длительного освещения на спектры фотопроводимости металлоорганических перовскитов на основе бромида свинца и йодида свинца и проведено сравнение полученных результатов. Анализ спектральных зависимостей фотопроводимости показал, что освещение белым светом интенсивностью 40 мВт/см^2 в течение 1 часа не изменяет форму спектров фотопроводимости как $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, так и $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$, в области межзонного поглощения. В то же время, в случае перовскитов на основе йодида свинца $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ длительное освещение приводит к увеличению фотопроводимости в области энергий квантов, меньших ширины запрещённой зоны. Мы полагаем, что это может соответствовать фотоиндуцированному увеличению плотности электронных состояний внутри запрещенной зоны $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Полученные результаты указывают на большую стабильность перовскитов на основе $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ при длительных световых воздействиях по сравнению с перовскитами на основе $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$.

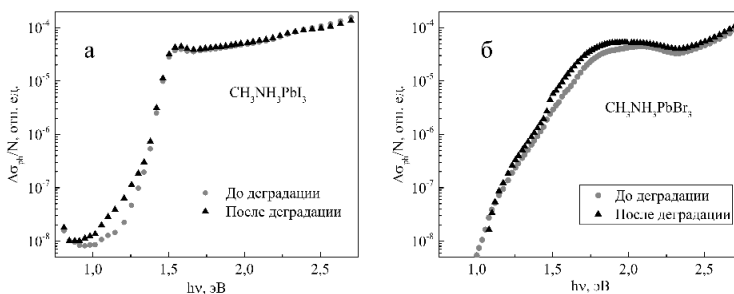


Рис. 1. Спектры фотопроводимости до и после деградации при длительном освещении перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (а); $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ (б)

Литература

1. J.H. Noh et al., Nano Lett., **13** (4), 1764-1769 (2013).

**ОБЪЕМНЫЕ ФОТОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ
С ОПТИЧЕСКИМИ МЕЖСОЕДИНЕНИЯМИ
ЧЕРЕЗ МИКРОКАНАЛЬНУЮ ПЛАСТИНУ**

^{}S.K. Lazарuk^{1,2}, A.A. Leshok¹, A.V. Dolbik¹, Le Dinh Vi¹, T.A. Kozlova¹, N.I. Kargin²,
V.A. Labunov¹*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31

**VOLUME PHOTONIC STRUCTURES BASED ON SILICON WITH OPTICAL
INTERCONNECTIONS THROUGH THE MICROCHANNEL PLATE**

^{}S.K. Lazарouk^{1,2}, A.A. Leshok¹, A.V. Dolbik¹, Le Dinh Vi¹, T.A. Kozlova¹, N.I. Kargin²,
V.A. Labunov¹*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013 Minsk, P. Browka 6, e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

²National Research Nuclear University MEPhI
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe Shosse 31

Design and manufacturing technology of volume silicon photonic structures is developed. Silicon chips placed over each other are separated by silicon microchannel vias plate, which serves as light waveguide. At the inner surfaces of Si chips the light emitting diodes and photodiodes on the basis of nanostructured silicon clusters embedded into alumina matrix are formed. The developed structure is characterized by the current conversion efficiency of 0.1% and can operate in the GHz range.

Для повышение быстродействия современных устройств интегральной электроники предлагается замена электронных межсоединений на оптические и создание кремниевой фотоники, основными элементами которой являются источники излучения и фотоприемники на основе кремния, связанные волноводами различных конструкций. Наряду с классическим подходом в проектировании устройств кремниевой фотоники с планарным расположением этих трех элементов [1], была предложена новая объемная технология [2] и теперь она интенсивно развивается. В данной работе представлена разработанная система, обеспечивающая междучиповые оптические межсоединения на основе кремниевых лавинных светодиодов и микроканальной пластины.

Экспериментальная структура междучиповых оптических межсоединений представлена на рис. 1. Микросистема состоит из двух кремниевых чипов, на поверхности которых сформированы матрицы диодных струк-

тур на основе барьеров Шоттки между алюминиевыми электродами и кремниевой поверхностью. Между поверхностями чипов расположена микроканальная кремниевая пластина.

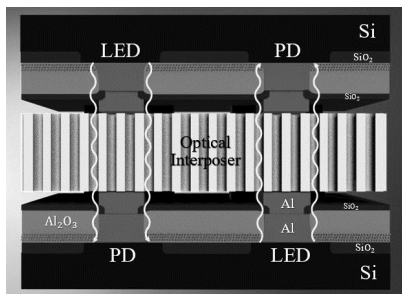


Рис. 1. Схематичное изображение экспериментальной структуры межчиповых оптических межсоединений

При использовании обратного электрического смещения на диодах более 12 В имеет место излучение света вдоль алюминиевых электродов. Излучаемый свет проходит через микроканалы кремниевой пластины (optical interposer) и на выходе из них регистрируется либо при помощи оптической микроскопии, либо при помощи кремниевого чипа со сформированными диодами, работающими в режиме регистрации оптического сигнала.

Исследование ВАХ лавинных диодов показало, что оптический сигнал регистрируется в диапазоне обратного смещения от 0 до 12 В. После превышения обратного смещения 12 В ВАХ со световым экспонированием и без него практически не отличаются, что объясняется появлением собственного светоизлучения в исследуемых структурах. При этом отклик исследуемых лавинных диодов с экспонированием от внешнего источника света (вольфрамовой лампы накаливания, обеспечивающей энергетическую освещенность поверхности 100 мВт/см^2) соизмерим с откликом на излучение лавинного светодиода при напряжении смещения 15 В и токе 30 мА, что свидетельствует о соизмеримости оптического потока обоих источников света.

Таким образом, разработаны конструкция и технология изготовления межчиповых оптических межсоединений. Среди основных характеристик разработанной системы необходимо отметить, что коэффициент преобразования по току достигает 0.1 %, что открывает новые возможности для развития кремниевой фотоники.

Литература

1. Silicon Photonics III / L. Pavesi, D.J. Lockwood eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 524 p. (2016).
2. С.К. Лазарук, А.А. Лешок, А.В. Долбик, В.А. Лабунов, В.А. Солодуха, С.В. Шведов. Мат. V Международной научной конференции «Наноструктурные материалы-2016: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2016)». Минск: Белорусская наука, с. 549 (2016).

**ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО
ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ**

**М.В. Руденко¹, А.В. Ермачихин², В.Г. Литвинов², Н.В. Вишняков², Н.В. Гапоненко^{1,3}, В.Р. Никитенко³, С.М. Завадский¹*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 123456, г. Минск, П.Бровки, дом 6, e-mail: nik@nano.bsuir.edu.by

²Рязанский государственный радиотехнический университет
Россия, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31

**CAPACITANCE-VOLTAGE HYSTERESIS OF NANOSTRUCTURED
STRONTIUM TITANATE**

**M.V. Rudenko¹, A.V. Ermachikhin², V.G. Litvinov², V.R. Nikitenko³, N.V. Vishnyakov³,
N.V. Gaponenko^{1,3}, S.M. Zavadskii¹*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
P. Browki St.6, 220013 Minsk, Belarus, e-mail: nik@nano.bsuir.edu.by

²Ryazan State Radioengineering University
Russia, 390005, Ryazan, Gagarin str. 59/1

³National Research Nuclear University MEPhI
115409, Russian Federation, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

A sol-gel method was used to generate the Ni/SrTiO₃/Si heterostructures with an active layer of nanostructured porous strontium titanate. The resulting structures have a hysteresis of the capacitance-voltage characteristics.

Титанат стронция активно используется в твердотельной электронике, в технике СВЧ при изготовлении диэлектрических антенн, фазовозвращателей, параметрических усилителей. Пленки титаната стронция широко используются для формирования пленочных структур электронной техники – конденсаторов, варисторов и мемристоров [1, 2].

Золь-гель методом синтезированы пленки пористого наноструктурированного титаната стронция толщиной ~ 650 нм (рис. 1 а) на подложке кремния с верхними электродами из никеля. Как видно из рисунка 1б, Ni/SrTiO₃/Si демонстрируют гистерезис вольт-фарадных характеристик. Частота тестового измерительного сигнала составляла 1 МГц. Изначально структура находилась в состоянии с максимальной электрической емкостью. Обход вольт-фарадного гистерезиса осуществлялся от 0 В против часовой стрелки, всего было проведено 3 обхода. Полярность подключения образца соответствует знаку электрического потенциала на Ni электроде.

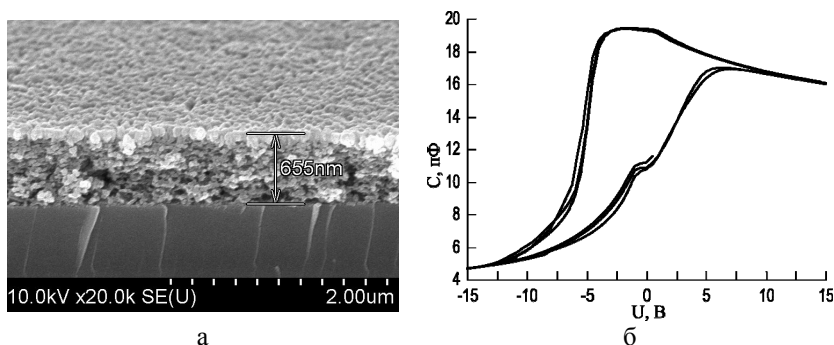


Рис. 1. РЭМ-изображение и вольт-фарадные характеристики при частоте 1 МГц гетероструктуры, содержащей десять слоев ксерогеля титаната стронция

Такая нелинейность обусловлена перезарядкой электрически активных глубоких энергетических уровней в слоях ксерогеля титаната стронция и на границе раздела Si/SrTiO₃ и SrTiO₃/Ni. Из C-V характеристик следует, что при переходе в область отрицательных смещений происходит уменьшение накопленного положительного заряда на глубоких уровнях и уменьшение электрической емкости. Вид характеристик показывает, что заряд конденсатора в основном образуется при подаче положительного напряжения. Нелинейное поведение емкости можно связать с формированием потенциальных ям в приповерхностном слое наноструктурированных зерен ввиду высокой пористости.

Литература

1. A. Schrott et al., Appl. Phys. Lett., **82**, 4770 (2003).
2. X. Сохраби Анараки и др., ФТТ, **57**, 1977 (2015).

**ВЛИЯНИЕ УНТ НА МАГНИТОСТАТИЧЕСКУЮ ИЗОЛЯЦИЮ
ПЛОТНОУПАКОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ ФЕРРОМАГНЕТИКА**

**С.Л. Прищепа^{1,2}, А.Л. Данилюк¹, А.В. Кухарев¹, F. Le Normand³*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: prischepa@bsuir.by

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31

³ICube/МаCEPV Laboratory, UMR 7357 CNRS-University of Strasbourg, BP20CR, 67037 Strasbourg Cedex, France

**IMPACT OF CNT ON THE MAGNETOSTATIC ISOLATION
OF DENSELY PACKED FERROMAGNETIC NANOPARTICLES**

**S.L. Prischepa^{1,2}, A.L. Danilyuk¹, A.V. Kukharev¹, F. Le Normand³*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Belarus, 220013 Minsk, P. Browka 6, e-mail: prischepa@bsuir.by

²National research Nuclear University MEPhI, Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe highway 31

³ICube/МаCEPV Laboratory, UMR 7357 CNRS-University of Strasbourg, BP20CR, 67037 Strasbourg Cedex, France

We investigate the influence of carbon nanotubes (CNT) aligned array on the magnetic properties of ensemble of densely packed (10^{10} cm^{-2}) Co nanoparticles (NP) (20 nm) embedded inside CNT. Each CNT contains only one nanosized Co. Samples are synthesized by chemical vapor deposition activated by current discharge plasma and hot filament (DC HF CVD) [1, 2]. It is established that the reference Co NP ensemble and Co NP embedded inside CNT behave differently in a magnetic field. In the former case Co NP are strongly coupled by the dipole-dipole interaction (DDI). For Co-CNT samples Co NP are magnetically isolated. The reason for suppressing the contribution of the DDI is the magnetic anisotropy [3].

Исследовалось влияние ориентированных массивов углеродных нанотрубок (УНТ) на магнитные свойства ансамбля плотноупакованных ($\approx 10^{10} \text{ см}^{-2}$) наночастиц Co диаметром ≈ 20 нм, встроенных внутрь УНТ. Каждая УНТ содержала одну наночастицу. Образцы синтезировались методом химического парофазного осаждения (ХПО) с плазменной активацией процесса [1, 2]. Ансамбль наночастиц Co изначально формировался на подложке Si/SiO₂ из ультратонкой (4.5 нм) пленки Co путем ее обработки в плазменно-активированной смеси H₂ и NH₃. Кристаллическая структура Co состояла из гранецентрированной кубической (г.ц.к.) и гексагональной плотноупакованной (г.п.у.) структур, что было установлено

независимыми методами ядерного магнитного резонанса и электронной дифракции. Рост массива вертикально ориентированных УНТ, используя наночастицы Co в качестве катализатора, проходил в смеси C₂H₂ и H₂ при давлении $p = 15$ мбар в течение 6 минут. Наночастицы Co локализованы сверху УНТ, имеют цилиндрическую форму с продольной осью параллельной оси УНТ и аспектным отношением в диапазоне 4÷10. Высота массива составляла порядка 1÷2 мкм.

В результате исследования магнитостатических свойств было установлено, что исходный образец с наночастицами Co на подложке и итоговый образец с наночастицами Co внутри УНТ обладали разными механизмами взаимодействия между наночастицами. В первом случае наночастицы связаны между собой сильным дипольным взаимодействием с формированием магнитных доменов размером в плане до 500 нм. Ось лёгкого намагничивания ориентирована параллельно плоскости плёнки. Для образца Co-УНТ наночастицы магнитно изолированы друг от друга. Причина, по которой во втором случае подавляется дипольное взаимодействие, – магнитная анизотропия [3]. Она существенно возрастает из-за особенной морфологии Co, встроенного в УНТ, и напряжений, вызванных воздействием нанотрубок.

Из экспериментальных данных оценены значения вкладов магнитной анизотропии, вызванной формой, кристаллической структурой и внутренними напряжениями [4]. Значения констант магнитоупругой анизотропии оценены для обоих типов кристаллической решётки Co, – г.ц.к. и г.п.у. Показано, что в силу присутствия г.п.у. кристаллической структуры, напряжения могут достигать существенных значений (≈ 10 Гпа), что приводит к значительной магнитоупругой анизотропии ($\approx 5.5 \cdot 10^5$ Дж/м³). Тем не менее, подобные внутренние напряжения в Co, встроенном внутрь УНТ, вызваны незначительной деформацией последних, не более 0.5÷2 % [5]. Влияние напряжений на магнитную структуру Co исследовано с помощью микромагнитных расчётов, что позволило определить преимущественную ориентацию гексагональной оси Co, которая ориентирована перпендикулярно оси УНТ.

Литература

- 1 C.S. Cojocaru and F. Le Normand, *Thin Solid Films*, **515**, 53 (2006).
- 2 J. Mane Mane, F. Le Normand, R.E. Medjo et al., *Mater. Sci. Appl.*, **5**, 966 (2014).
- 3 A.L. Danilyuk, I.V. Komissarov, V.A. Labunov et al., *New J. Phys.*, **17**, 023073 (2015).
- 4 S. Oyarzún, A. Tamion, F. Tournus et al., *Sci. Rep.*, **5**, 14749 (2015).
- 5 M.F. Yu, O. Lourie, M.J. Dyer et al., *Science*, **287**, 637 (2000).

КОНДЕНСАТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПЛЁНОК ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ И МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

*П.А. Холов¹, *Н.В. Гапоненко^{1,2}, Д.А. Голосов¹, В.В. Колос³, А.А. Шевченко⁴,
Х. Сохраби Анараки¹, Н.И. Каргин²*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: nik@nano.bsuir.edu.by

²НИЯУ МИФИ, Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.

³ОАО "Интеграл", ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск, 220108, Беларусь

⁴ГНУ "Институт порошковой металлургии" ул. Платонова, 41г.
Минск, 220005, Беларусь

**CAPACITOR STRUCTURES ON THE BASIS OF STRONTIUM TITANATE FILMS
FEBRICATED WITH SOL-GEL METHOD AND MAGNETRON SPUTTERING**

*P.A. Kholov¹, *N.V. Gaponenko^{1,2}, D.A. Golosov¹, V.V. Kolos³, A.A. Shevchenok⁴,
H. Sokhrabi Anaraki¹, N.I. Kargin²*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Belarus, 220013 Minsk, P. Browki str. 44, e-mail: nik@nano.bsuir.edu.by

²NRNU MEPhI, Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

³"Integral", Belarus, 220108 Minsk, Kazintsa 121 A

⁴Institute of Powder Metallurgy, Belarus, 220005 Minsk, Platonova str. 41

We compare the characteristics of capacitors on the basis of SrTiO₃ films prepared using either sol-gel technology or magnetron sputtering. The values of capacity for the frequency of 1 MHz in the range 330÷500 with tgδ 0.06÷0.1 for the films 200÷430 nm in thickness were obtained.

Технологии получения перовскитов BaTiO₃ и SrTiO₃ активно исследуются для формирования конденсаторов, мемристоров и других устройств электронной техники. Электрофизические свойства пленок зависят от технологии синтеза. В данной работе определены значения диэлектрической проницаемости (ε) и тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ) тонкопленочных конденсаторов на основе пленок титаната стронция, полученных золь-гель методом [1] и ВЧ магнетронным распылением. Пленки титаната стронция формировались на структуре Si/TiOx/Pt, верхние электроды формировались напылением никеля.

На рисунке 1 (а) представлено типичное изображение конденсаторной структуры, полученные методом растровой электронной микроскопии. Толщина пленки титаната стронция, полученной магнетронным распылением, составила приблизительно 200 нм. Пики рентгеновской дифракции (рис. 1 (б)), соответствуют кубической фазе SrTiO₃ с симметрией Pm3m (PDF 01-086-0179).

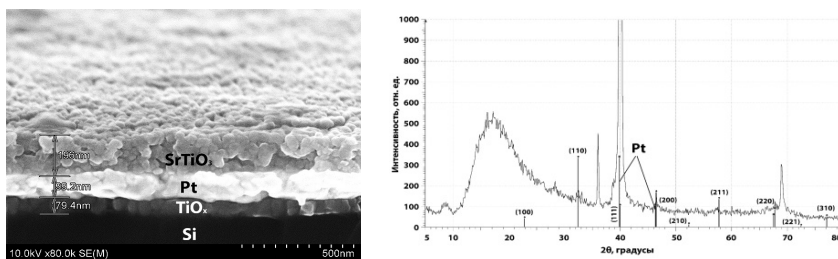


Рис. 1. РЭМ изображение (а) и дифрактограмма (б) структуры с Si/TiOx/Pt с пленкой титаната стронция, полученной методом ВЧ магнетронного распыления, после отжига при температуре 750 °С в течение 60 мин

Результаты измерений $\text{tg}\delta$ и ϵ на частоте 1 МГц показали, что для сформированной магнетронным распылением пленки толщиной 200 нм получены средние значения величин: $\epsilon = 124$ и $\text{tg}\delta = 0.1$ (табл. 1).

Таблица 1

Параметры конденсаторных структур

№	C, пФ	Диэлектрическая проницаемость, ϵ	Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$	Способ формирования	Толщина, нм
1	498	124	0.1	магнетронное напыление	200
3	589	186	0.08	золь-гель	250
4	413	153	0.06	золь-гель	280
5	335	190	0.1	золь-гель	430

Возможно, большее значение диэлектрической проницаемости, полученное для золь-гель метода, связано с проведением дополнительной термообработки при наращивании последующих слоев. Для обеих технологий при толщинах пленок титаната стронция меньше 200 нм часто наблюдался пробой структуры.

Литература

1. Х. Сохраби Анараки и др., Микроэлектроника, **44**, 6 (2015).

**ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ
EuO/ГРАФЕН И Eu/ГРАФЕН**

**И.С. Соколов, Д.В. Аверьянов, И.А. Каратеев, А.М. Токмачёв, О.Е. Парфёнов,
А.Н. Талденков, О.А. Кондратьев, В.Г. Сторчак*

НИЦ «Курчатовский институт»
Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1,
e-mail: sokolov.ivan.qed@gmail.com

**INTERFACIAL PHENOMENA IN EPITAXIAL HETEROSTRUCTURES
EuO/GRAPHENE AND Eu/GRAPHENE**

**I.S. Sokolov, D.V. Averyanov, I.A. Karateev, A.M. Tokmachev, O.E. Parfenov, A.N. Taldenkov,
O.A. Kondratev, V.G. Storchak*

National Research Centre “Kurchatov Institute”
Russia, 123182, Moscow, Kurchatov Sq. 1, e-mail: sokolov.ivan.qed@gmail.com

Graphene – a well-known 2D material – is considered as a promising platform for design of novel devices with low power consumption. Nowadays, considerable efforts are invested to produce magnetism in graphene in order to utilize spin phenomena.

Here we present integration of single layer and bilayer graphene with ferromagnetic insulator EuO and sub-monolayer Eu films using molecular beam epitaxy. The films are characterized by electron and X-ray diffraction, cross-sectional electron microscopy and SQUID magnetization measurements. EuO/graphene structures exhibit ferromagnetic behavior. Transport measurements show carrier mobility typical to graphene. The dependence $R_{xx}(B)$ in EuO/graphene structures is strongly non-linear suggesting the presence of the anomalous Hall Effect.

Увеличение вычислительных мощностей современных устройств во многом ограничено энергетическими затратами на поддержание их работы. Создание устройств с низким потреблением энергии является приоритетным направлением развития современной микроэлектроники.

Одним из путей решения данной задачи является создание устройств на основе спин-поляризованного транспорта. Значительный интерес в рамках создания устройств на основе спиновой логики представляет графен. Данное обстоятельство обусловлено тем, что графен является проводником спинового тока с большой длиной спиновой когерентности. Также, теоретически показано, что в графене возможно добиться разделе-

ния электронов по спину за счет эффекта близости с магнитными моментами [1–3].

В данной работе была разработана методика роста гетероструктур EuO/Графен и Eu/Графен методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Качество пленок контролировалось методами *in situ* дифракции быстрых электронов, рентгеновской дифрактометрии, просвечивающей электронной микроскопии. В результате подбора ростовых параметров была получена пленка монооксида европия без примесей высших оксидов с кристаллитами двух типов: преобладающими (100), латерально развернутыми относительно друг друга на угол 30° в соответствии с направлениями в графене, и небольшими включениями кристаллитов с ориентацией (111). Изображения просвечивающей электронной микроскопии подтверждают отсутствие посторонних фаз, высокое кристаллическое качество в пределах зерна и резкость границ разделов гетероструктуры. В случае бескилородного роста была сформирована поверхностная фаза $\text{Eu } \sqrt{3} \times \sqrt{3}$, соответствующая степени покрытия $1/6$ монослоя.

В образцах с гетероструктурами типа EuO/Графен наблюдается ферромагнитный переход в окрестности $T_C = 69$ К. Полевая зависимость магнитного момента демонстрирует поведение характерное для ферромагнитных пленок EuO. Вычисленный по толщине момент на атом μ_{eff} дает величину $\sim 7 \mu_B/\text{Eu}$, что согласуется с теоретическим значением для EuO. В то же время измеренная подвижность носителей в структуре характерна для графена. Зависимость $R_{xx}(B)$ в структурах EuO/Графен существенно нелинейна до $T_C^* = 220$ К. Данное поведение предположительно связано с аномальным эффектом Холла, что позволяет говорить о спинполяризованном транспорте в графене. В структурах Eu/Графен в рамках чувствительности СКВИД-магнитометрии ферромагнетизм не обнаружен. На зависимости $R_{xx}(B)$ обнаружены осцилляции Шубникова – де Гааза.

Представленная работа проведена при частичной поддержке НИЦ «Курчатовский институт», РФФИ (гранты 16-07-00204, 16-29-03027 и 17-07-00170) и РНФ (грант 14-19-00662).

Литература

1. J. Klinkhammer, PhD thesis, Electronic Structure and Magnetism of EuO Films on the Nanometer Scale (2013).
2. A.G. Swartz, P.M. Odenthal, Y. Hao et al., ACS Nano, **6**, pp. 10063-10069 (2012).
3. J. Klinkhammer, D. F. Forster, S. Schumacher et al., APL, **103** (2013).

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ КОВАЛЕНТНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ CL-20

**М.А. Гимальдинова, М.М. Маслов, К.П. Катин, Р.В. Рыжук, Н.И. Каргин*

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31,
e-mail: margaritagimaldinova@gmail.com

NUMERICAL SIMULATION OF LOW-DIMENSIONAL COVALENT STRUCTURES BASED ON CL-20 HIGH-ENERGY MOLECULES

**M.A. Gimaldinova, M.M. Maslov, K.P. Katin, R.V. Ryzhuk, N.I. Kargin*

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: margaritagimaldinova@gmail.com

One-dimensional and two-dimensional CL-20 systems consisting of individual CL-20 fragments connected by means of CH₂ molecular bridges for the covalent bonding have been constructed. The energy and electronic properties of the molecules have been analyzed by means of density functional theory with PBE and PBE0 functionals with the 6-311G(d,p) electron basis set. The hypothesis is confirmed that the formation of solids based on the molecules of CL-20 is energetically favorable. Also it was proven that the problem of using these structures in nanoelectronic applications can be eliminated.

Ранее была доказана принципиальная возможность формирования ковалентных связей между отдельными наносистемами CL-20 посредством молекулярных мостиков CH₂. На основании этого в данной работе были сконструированы квазиодномерные и квазидвумерные системы на основе молекул CL-20, – простые и двойные цепи (рис. 1).

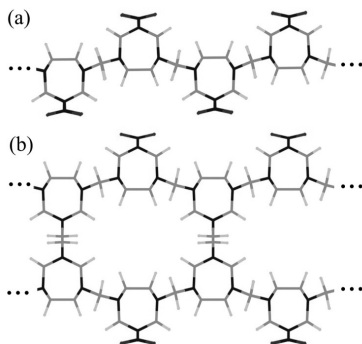


Рис. 1. Общая схема образцов: (a) – простая цепь; (b) – двойная цепь

Отдельно были рассмотрены различные комплексы, состоящие из 12 фрагментов CL-20: двойная цепь размерностью 6×2 , а также два типа молекулы 4×3 , отличающихся по типу структуры – linear и zigzag (рис. 2).

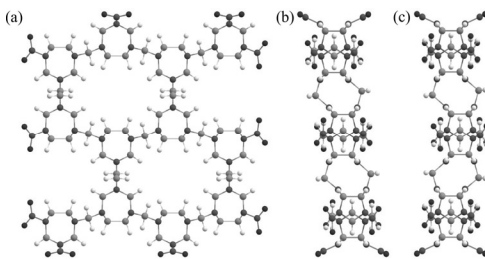


Рис.2. Молекула 4×3 : (a) – типа linear (вид спереди); (b) – типа linear (вид сбоку); (c) – типа zigzag (вид сбоку)

Начальная геометрия систем была предоптимизирована в рамках неортогональной модели сильной связи NTBM [1]. Расчеты структурных, энергетических и электронных характеристик проводились с помощью программного комплекса GAMESS [2] в рамках теории функционала плотности (DFT) с GGA функционалом PBE и его гибридным аналогом PBE0 и базисом 6-311G(d,p).

Для рассматриваемых систем была определена энергия связи

$$E_b = 1/N_{at} [kE(H) + lE(C) + mE(N) + nE(O) - E(L)],$$

где $N_{at} = k + l + m + n$ – полное число атомов в слое, $E(L)$ – полная энергия слоя на основе фрагментов CL-20, $E(H)$, $E(C)$, $E(N)$ и $E(O)$ – энергии изолированных атомов водорода, углерода, азота и кислорода соответственно. Было установлено, что термодинамическая устойчивость возрастает с ростом эффективного размера системы, причем наиболее устойчивыми оказались «замкнутые» двумерные системы – двойные цепи, состоящие из 6 и 10 фрагментов CL-20. Также были определены такие характеристики как НОМО-LUMO щель, химический потенциал, твердость, мягкость и электрофильность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МК-4040.2018.2.

Литература

1. M.M. Maslov, A.I. Podlivaev, K.P. Katin, *Mol. Simul.*, **42**, 305 (2016).
2. M.W. Schmidt et al., *J. Comput. Chem.*, **14**, 1347 (1993).

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АЗОТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЗАМЕЩЕНИЯ
В АЗАФУЛЛЕРЕНАХ $C_{20-n}N_n$ ($n = 0 - 4$)**

**И.Ю. Долгинский, Н.В. Новиков, М.А. Гимальдинова, К.П. Катин, М.М. Маслов,
Р.В. Рыжук, Н.И. Каргин*

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: dolinsky94@yandex.ru

**INTERACTION OF SUBSTITUTIONAL NITROGEN DEFECTS IN AZAFULLERENES
 $C_{20-n}N_n$ ($n = 0 - 4$)**

**I.Y. Dolinskiy, N.V. Novikov, M.A. Gimaldinova, K.P. Katin, M.M. Maslov,
R.V. Ryzhuk, N.I. Kargin*

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: dolinsky94@yandex.ru

The structures of dodecahedral fullerene C_{20} and its nitrogen-doped derivatives are considered. Effective repulsion of nitrogen defects on the fullerene surface is demonstrated: the isomers with the largest distances between substitutional nitrogens have the lowest energy. It is established that the stability of nitrogen-doped fullerenes decreases linearly as the concentration of nitrogen defects increases.

Настоящая работа посвящена исследованию структуры изомеров, возникающих при введении замещающих азотных дефектов в наименьший возможный фуллерен C_{20} .

Исследование проводилось в рамках неортогональной модели сильной связи NTBМ [1], обеспечивающей хорошее соответствие рассчитанных энергий связи с экспериментальными данными [1]. Рассматривались всевозможные изомеры допированных азотом фуллеренов $C_{20-n}N_n$ ($n = 0-4$), отвечающих разным положениям атомов азота друг относительно друга.

Согласно полученным результатам, наименьшей энергией обладают те изомеры $C_{20-n}N_n$, в которых атомы азота максимально удалены друг от друга (см. рис. 1а). Эффективная энергия отталкивания азотных дефектов, находящихся на соседних узлах фуллерена, составляет ~ 30 мэВ. Дефекты, находящиеся не на соседних узлах, взаимодействуют слабо, что подтверждается почти линейным увеличением энергии связи в допированных фуллеренах $C_{20-n}N_n$ с ростом n (см. рис. 1б).

Можно ожидать, что линейный характер этой зависимости нарушится при больших концентрациях дефектов, когда проявится их взаимодействие между собой. Однако системы с таким высоким содержанием азота

(более 20 %) менее устойчивы [2] и не применяются в приложениях, и поэтому не рассматриваются в настоящей работе.

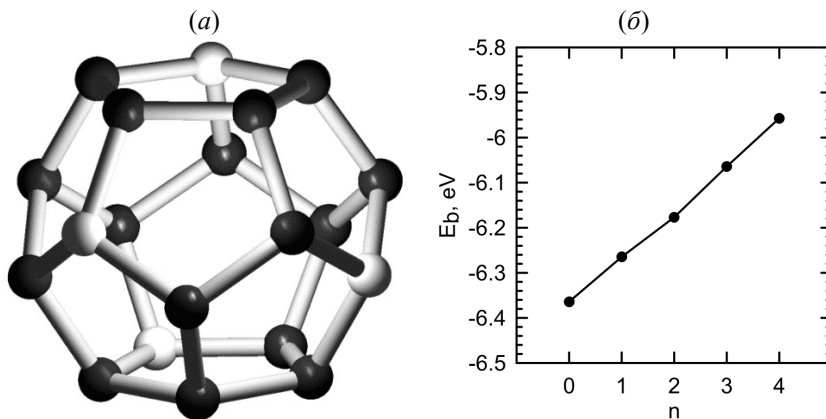


Рис. 1. (а) Атомистическая структура додекаэдрического фуллерена $C_{16}N_4$, содержащего четыре азотных дефекта замещения. (б) Зависимость энергии связи E_b допированного азотом фуллерена $C_{20-n}N_n$ от количества азотных дефектов n . Для каждого n рассматривается изомер $C_{20-n}N_n$, обладающий наименьшей энергией, что соответствует максимальному удалению атомов азота друг от друга

В заключение отметим, что проведенные нами квантово-химические расчёты в рамках модели сильной связи позволили предсказать структуру фуллеренов, допированных азотом. Системы с высокой концентрацией азота обладают большей энергией, что уменьшает вероятность их формирования и затрудняет их синтез. Мы считаем, что изложенные результаты будут содействовать последующему экспериментальному и теоретическому изучению азотосодержащих фуллеренов и их производных.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (грант № МК-7410.2016.2)

Литература

1. М.М. Maslov, А.И. Podlivaev, К.Р. Katin, Mol. Simul., **42**, 305 (2016).
2. К.Р. Katin, М.М. Maslov, Physica E, **96**, 6 (2018).

**ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ПОЛИПРИЗМАНОВ**

**Н.В. Новиков, И.Ю. Долинский, М.А. Гимальдинова, К.П. Катин, М.М. Маслов,
Р.В. Рыжук, Н.И. Каргин*

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: NickNovikovvv@mail.ru

**EFFECT OF MECHANICAL DEFORMATIONS ON ENERGY AND ELECTRONIC
PROPERTIES OF CARBON POLYPRISMANES**

**N.V. Novikov, I.Y. Dolinskiy, M.A. Gimaldinova, K.P. Katin, M.M. Maslov,
R.V. Ryzhuk, N.I. Kargin*

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: NickNovikovvv@mail.ru

The influence of mechanical impact on electronic and energy properties of carbon polyprismanes have been theoretically investigated. We developed the software that simulate mechanical strains on different carbon systems. Using the example of [10,5]prismane the stiffness of low-dimensional carbon systems has been studied by means of quantum-mechanical calculations based on density functional theory. The effect of mechanical impact on HOMO-LUMO gap of test sample has been defined. HOMO-LUMO gap has been found to decrease under all kinds of mechanical stresses. The virtual transition of polyprismanes to class of semiconductors was observed.

В ходе моделирования механического воздействия на [10,5]призман, определена зависимость термодинамикой устойчивости углеродных полипризманов (см. Рис. 1) от различного рода механических напряжений. Результаты настоящей работы свидетельствуют об изменении энергетических свойств систем с нетрадиционной геометрией углеродного каркаса, что не без основания дает право полагать о том, что на основе полипризманов можно будет создать устройства с управляемыми электронными свойствами.

Расчеты структурных и энергетических характеристик полипризмана проводились с помощью программного комплекса GAMESS [1] в рамках теории функционала плотности (DFT) в базе 6-31G(d) с использованием двух функционалов: функционал обобщенного градиентного приближения PBE [2] и гибридный обменно-корреляционный функционалом B3LYP [3,4]. В ходе работы был разработан программный пакет, позволяющий механически воздействовать на различные углеродные системы.

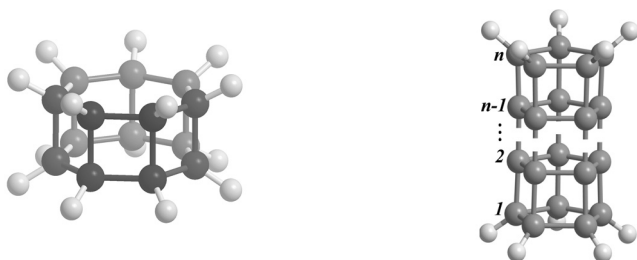


Рис. 1. Углеродные полипризмы: [2,7]призма (слева) и [n,5]призма (справа)

Исследуемый образец [10,5] призма подвергся продольным деформациям (продольному растяжению и сжатию), латеральному растяжению и сжатию, а также скручиванию системы вокруг центральной оси полипризмы. Энергия связи, посчитанная как в функционале B3LYP, так и PBE, уменьшается под действием всех видов механического воздействия. Из этого можно сделать выводы, что механические напряжения дестабилизируют призма и углеродная система становится менее термодинамически устойчивой. Для каждой получившейся углеродной системы были найдены НОМО-LUMO щели. С увеличением механической деформации [n,m]призм ширина запрещенной зоны уменьшается. Так, например, для функционалов B3LYP и PBE при деформации в 10% размер НОМО-LUMO щели примерно уменьшился на 1.2 эВ, что в процентном соотношении составляет 50% и 86% соответственно. Это свидетельствует о возможном переходе полипризм в класс полупроводников. Наиболее перспективным оказалось использовать растяжение углеродной системы вдоль главной оси. Такое механическое воздействие дало наибольшую разницу между недеформированной и растянутой на 10% молекулой. Мы надеемся, что настоящая работа будет способствовать дальнейшему исследованию физико-химических свойств углеродных полипризм и позволит подтолкнуть развитие электронных устройств.

Литература

1. M.W. Schmidt et al., J. Comput. Chem., **14**, 1347 (1993).
2. J.P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, Phys. Rev. Lett., **77**, 3865 (1996).
3. C. Lee, W. Yang, R.G. Parr, Phys. Rev. B, **37**, 785 (1988).
4. A.D. Becke, J. Chem. Phys., **98**, 5648 (1993).

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ХЛОРОФИЛЛА**

**И.А. Белогорохов¹, Л.И. Белогорохова²*

¹Институт физиологически активных веществ РАН,
Россия, 142432, г. Черноголовка, Северный проезд, 1, e-mail: jugqwerty@mail.ru
²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова Дом 1,
строение 2, Физический Факультет

**PHYSICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED
ON CHLOROPHYLL**

**I.A. Belogorokhov¹, L.I. Belogorokhova²*

¹Institute of Physiologically Active Compounds, Russian Academy of Sciences
Russia, 142432, Chernogolovka, Northern Passage, 1, e-mail: jugqwerty@mail.ru
²Department of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991, Moscow, Faculty of Physics M.V. Lomonosov
Moscow State University Leninskie Gory

This work is devoted to the study of the optical properties of composite materials based on chlorophyll complexes. For the research work, methods of IR spectroscopy and luminescence analysis were used. In the course of the work, spectra of photoluminescence of chlorophyll-based composites in the visible region were obtained and analyzed. It is shown that when the chlorophyll is introduced into the polymer matrix, the main maximum shifts toward larger wavelengths. The results of the luminescent analysis showed that the complexity of the polymer matrix and composition of the composite in the photoluminescence spectrum of composite materials based on chlorophyll may give rise to an additional spectral maximum.

Растения – белковые соединения, формирующие царство многоклеточных организмов [1]. Простота определения указанного термина не до конца раскрывает истинный масштаб растительного мира. Мхи, папоротники, хвощи, плауны, голосеменные, водоросли, деревья, кустарники, травы и цветковые растения – только лишь определения групп как биологических классификаторов, какие знакомы каждому со страниц учебников по биологии. В тоже время, растительный мир давно раскрыл свой потенциал как источник ценных научных материалов в плане химии высокомолекулярных соединений. К примеру, широко распространенные комплексы порфирина входят в состав таких важных соединений как гемоглобин и хлорофилл [2–3]. Последний отвечает за эффективность фотосинтеза –

образование в клетках зелёных растений и водорослей углеводов из углекислоты и воды под воздействием света. Однако вопрос об использовании хлорофилла в решении современных задач микроэлектроники остается открытым.

В связи с этим целью данной работы являлось определение основных оптических характеристик композиционных материалов на основе молекул хлорофилла.

Для исследования физических свойств композитов применялись методы ИК- спектроскопии и люминесцентного анализа.

В ходе экспериментов получены и проанализированы спектры пропускания композиционных материалов на основе хлорофилла, фталоцианинов и полимеров в области $500\text{--}5000\text{ см}^{-1}$. Расшифровка и анализ спектральных линий позволили установить, что при помещении в полимерную матрицу хлорофилл сохраняет изначальные химические свойства.

Впервые получены и проанализированы спектры фотолюминесценции композиционных материалов на основе хлорофилла в видимой области спектра. Показано, что при внедрении хлорофилла в полимерную матрицу происходит смещение главного максимума в сторону больших длин волн.

Показано, что при усложнении полимерной матрицы и состава композита в спектре фотолюминесценции композиционных материалов на основе хлорофилла может возникать дополнительный максимум.

Результаты люминесцентного анализа показали, что при помещении хлорофилла в полимерную матрицу интенсивность сигнала фотолюминесценции увеличивается на два порядка по сравнению с чистым хлорофиллом.

Литература

1. A.J. Shaw and B. Goffinet, *Bryophyte Biology*. Cambridge: Cambridge University Press (2000).
2. M. Tswett, *Ber. Dtsch. Botan. Ges.* **24**, 316–323 (1906).
3. Г.Л. Билич, В. А. Крыжановский, *Биология. Полный курс: В 4 т., Издание 5-е, дополненное и переработанное.*, М.: Издательство Оникс, Т. 1–4. 864 с. (2009).

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МАКРОЦИКЛИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

**И.А. Белогорохов¹, Л.И. Белогорохова²*

¹Институт физиологически активных веществ РАН,
Россия, 142432, г. Черноголовка, Северный проезд, 1, e-mail: jugqwerty@mail.ru
²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы,
МГУ имени М.В. Ломоносова Дом 1, строение 2, Физический Факультет

PHYSICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON PHTHALOCYANINES

**I.A. Belogorokhov¹, L.I. Belogorokhova²*

¹Institute of Physiologically Active Compounds, Russian Academy of Sciences
Russia, 142432, Chernogolovka, Northern Passage, 1, e-mail: jugqwerty@mail.ru
²Department of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991, Moscow, Faculty of Physics M.V. Lomonosov
Moscow State University Leninskie Gory

This work is devoted to the study of the optical properties of composite materials based on phthalocyanine complexes. For the research work, methods of IR spectroscopy and luminescence analysis were used. The transmission spectra from the middle IR region, as well as the photoluminescence spectra of polymeric composite materials based on a nonmetallic monophthalocyanine, and also on the basis of phthalocyanines erbium, europium and lutetium were obtained and analyzed. The results of the work showed that in the near infrared region, polymeric composite materials based on phthalocyanines of rare metals can have a photoluminescence signal in the 1500÷1700 nm region.

Аналитические методы современной химии позволяют проводить научно-поисковые работы с любыми типами материалов. Полупроводники, металлы, диэлектрики – ученые могут узнать любую информацию об их свойствах [1-3]. В последние годы нового века органические материалы выделяют как отдельный класс веществ [4]. Но даже у органических полупроводников существуют большие ограничения, как по набору полезных свойств так и по способам промышленного применения. Сложно добиться, чтобы синтезированные молекулы одновременно обладали нужной проводимостью, пластичностью, объемом и оптическими характеристиками. И для устранения данного недостатка был синтезирован композитный материал. Композит – это многокомпонентный материал, состоящий, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной

наполнителями, обладающими высокой прочностью, жесткостью. Особый интерес вызывают композитные материалы на основе макроциклических соединений, поскольку макроциклы частично входят в состав таких образований как гемоглобин и хлорофилл. Поэтому целью данной работы было изучить оптические свойства композитных материалов на основе макроциклических комплексов.

С помощью метода ИК-спектроскопии получено описание вибронных переходов в исследуемых образцах композиционных материалов. Получено описание линий поглощения, отвечающих основным химическим связям и структурным группам входящих в состав композитов макроциклических комплексов фталоцианинов (углерод-водородные группы, изоиндолные группы, бензольные группы, фталоцианиновое кольцо, пиррольное кольцо, мезо-атомы азота).

Доказано, что органическая матрица на основе полимера не приводит к разрушению входящих в состав композитов макроциклических комплексов.

Показано, что полимерные композитные материалы на основе фталоцианинов обладают четкими максимумами люминесценции в области 650÷880 нм. Причиной возникновения максимумов может служить как переходы между молекулярными обителями, так и образование молекулярных экситонов.

В ближней инфракрасной области полимерные композитные материалы на основе фталоцианинов редких металлов могут обладать сигналом фотолюминесценции в области 1500÷1700 нм.

Литература

1. М. С. Котова, М. А. Дронов, И. А. Белогорохов, А. С. Воронцов, М. Н. Мартышов, П. А. Форш, В. Е. Пушкарев, Л. Г. Томилова. *Russian scientific j.*, **4** (42), 102-112 (2014).
2. М. А. Дронов, И. А. Белогорохов, А. А. Донсков, М. С. Котова, Л. И. Белогорохова, А. С. Воронцов. *Russian scientific j.*, **4** (42), 158-171 (2014).
3. И. А. Белогорохов, М. С. Котова, А. А. Донсков, М. А. Дронов, А. С. Воронцов. *Russian scientific j.*, **4** (42), 184-193 (2014).
4. И. Белогорохов. Оптические и электрические свойства фталоцианиновых полупроводников. Структуры на основе молекулярных комплексов фталоцианинов, содержащих ионы лантанидов в качестве комплексообразователя, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG 2010, с.140.

ЯНУС-ПОДОБНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ КАК АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ СИСТЕМ

^{}Н.А. Торхов^{1,2}, А.В. Номоев³, Б.Б. Балданов³*

¹Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов

Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А, e-mail: trkf@mail.ru

²Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 36

³Бурятский государственный университет, Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а

JANUS-LIKE NANOPARTICLES AS ACTIVE ELEMENTS OF WIDEBAND RADAR-ABSORBING SYSTEMS

^{}N.A. Torkhov^{1,2}, A.V. Nomoev³, B.B. Baldanov³*

¹Scientific- Research Institute of Semiconductors

99A, Krasnoarmeiskaya Str., Tomsk, 634034, Russia, tel.: 83822-288122, e-mail: trkf@mail.ru

²Tomsk State University, 36, Lenina Av., Tomsk, Russia, 634050

³Buryat State University, 24a, Smolina Av., Ulan-Ude, Russia, 670000

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.

Актуальность развития широкополосных радиопоглощающих покрытий определяется тем, что оно позволяет значительно улучшить характеристики существующих систем радиоэлектронной защиты, а также дает возможность разрабатывать на основе новых принципов функционирования системы видеонаблюдения и спектрального анализа с улучшенными характеристиками. 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, TiO₂, ZrO₂, Fe₂O₃, Fe₃C, α-Si:H, α-C:H [1, 2] и др. Используемые технологии имеют ряд ограничений по частотному диапазону (десятки гигагерц), 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, Ta₂Si/Si, Ag/Si и др. (рис. 1) [3] обладают дополнительными степенями свободы, обусловленными электрическим (или магнитным) моментом,

внутренней емкостью, что позволяет преодолеть большинство из существующих технических ограничений.

Исследования электростатической системы таких частиц методом зонда Кельвина АСМ подтвердили наличие у них заметного дипольного момента [4]. Таким образом, подбирая величину внешнего электрического E (или магнитного B) поля в субмикронной радиопоглощающей ячейке (рис. 2) можно управлять их внутренней емкостью (импедансом), а также резонансной частотой их механических и электрических колебаний в более широком (до ТГц) частотном диапазоне электромагнитных излучений. Достаточная технологичность их изготовления дает возможность разработать на их основе широкополосные системы радиовидения и спектрально-го анализа.

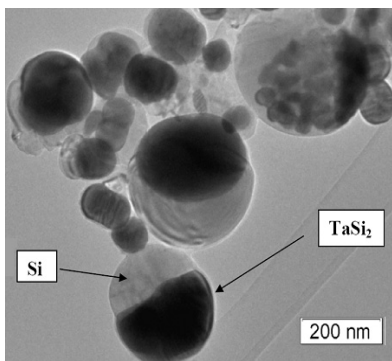


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение комплекса янус-подобных наночастиц $TaSi_2/Si$

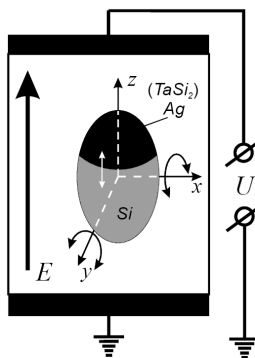


Рис. 2. Принципиальная схема радиопоглощающей ячейки на основе янус-подобной наночастицы

Литература

1. В.В. Петров, Г.А. Николайчук, С.В. Яковлев, Л.В. Луцев, Компоненты и технологии, 10, 60–63 (2008).
2. С.В. Головатая, Н.В. Ковальчук, Н.В. Колбун, А.А. Позняк, Крымико, 589-590 (2009).
3. A. V. Nomoev et al., J. Nanomaterials, 26-35 (2015).
4. А.В. Номоев, А.Р. Раднаев, Б.Б. Балданов, А.Н. Торхов, Б.Р. Раднаев, Н.А. Романов, 5-я Всероссийская конференция “Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий”, Сборник конференции в двух томах, т. II, вып. 5, 56-60 (2015).

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ АНИЗОТРОПИЯ ДИСПЕРСИИ ПАВ
В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ / ЛАНГАСИТ**

**А.И. Шарков, А.Ю. Клоков, В.А. Цветков, Д.Ф. Аминев*

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53, e-mail: shark@lebedev.ru

**SPATIAL ANISOTROPY OF SAW DISPERSION IN THE METAL / LANGASITE
HETEROSTRUCTURES**

**A.I. Sharkov, A.Yu. Klokov, V.A. Tsvetkov, D.F. Aminev*

P.N. Lebedev Physical Institute RAS
Russia, 119991, Moscow, Leninskii pr. 53, e-mail: shark@lebedev.ru

Surface acoustic wave (SAW) propagation patterns at Z-cut langasite crystal covered by gold films, were measured by means of Pump-Probe method. It was found strong anisotropy of SAW propagation and its dispersion. Group velocities and dispersion peculiarities of these waves was determined for the set of propagation direction along Z-cut surface.

Одним из перспективных материалов акустоэлектроники является лангасит ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$), превосходящий по совокупности параметров традиционные кварц, ниобат лития и др. [1]. В настоящее время имеющиеся в литературе данные о распространении/затухании поверхностных и объемных волн в лангасите ограничиваются диапазоном частот ~ 1 ГГц. Применение оптических методов возбуждения и детектирования упругих волн, а именно так называемых методов пикосекундной акустики [2], позволяет продвинуться в гиперзвуковую ($1 \text{ ГГц} \div 1 \text{ ТГц}$) область частот.

Целью данной работы было изучение анизотропии распространения и частотной дисперсии ПАВ в лангасите,

На поверхность пластин лангасита Z-среза были термически напылены плёнки золота толщиной от 50, 150 и 250 нм. Генерация ПАВ производилась импульсами второй гармоники ($\lambda_B = 400 \text{ нм}$) титан-сапфирового лазера MIRA-900, работающего в фемтосекундном режиме ($\tau \sim 150 \text{ фс}$, $f \sim 76 \text{ МГц}$). Зондирование осуществлялось импульсами первой гармоники того же лазера ($\lambda_3 = 800 \text{ нм}$). Прохождение ПАВ вызывает малые изменения амплитуды и фазы зондирующего луча ($\sim 10^{-6} \div 10^{-3}$), отражённого от исследуемой структуры, что детектируется с помощью интерферометра Саньяка [3]. Картографирование поля ПАВ проводилось путём сканирования зондирующим лучом по поверхности образца. Пространственное разрешение составляло $\sim 2 \text{ мкм}$, а временное $\sim 1 \text{ пс}$.

На рис. 1 а-в приведены зарегистрированные картины волнового поля поверхностной волны. Концентрические структуры с осевой симметрией 6-го порядка на рисунках соответствуют волновым фронтам ПАВ, возбуждённых последовательными импульсами, следующими друг за другом через 13.1 нс.

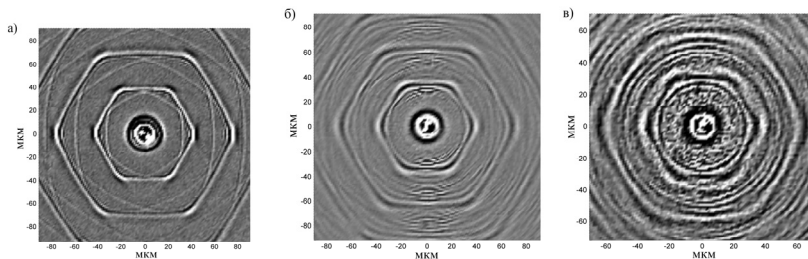


Рис. 1. Картины распространения ПАВ по поверхности золотая плёнка / лангасит Z-среза при толщине плёнки а) 50 нм, б) 150 нм, в) 250 нм

По мере распространения вдоль поверхности импульс ПАВ заметно уширяется и меняет форму. Это связано с частотной дисперсией, вызванной наличием металлической плёнки, причём величина дисперсии различна для разных кристаллографических направлений в латеральном направлении. Сравнивая картины ПАВ для плёнок разной толщины можно заметить, что с увеличением толщины золотой плёнки от 50 до 250 нм частотная дисперсия последовательно усиливается. Анализ картины распространения ПАВ позволил получить информацию о распространении и дисперсии ПАВ по различным кристаллографическим направлениям вдоль Z-среза.

Авторы благодарны Медведеву А.В. за предоставленные пластины лангасита. Работа поддерживалась грантами ПФИ Президиума РАН «Наноструктуры: Физика, Химия, Биология, Основы технологий».

Литература

1. D.V. Roshchupkin, Crystallography Reports, **49** (1), S80–S88 (2004).
2. H.-Y. Hao and H.J. Maris, Phys. Rev. B, **63**, 224301 (2001).
3. Takehiro Tachizaki, Toshihiro Muroya, and Osamu Matsuda, Yoshihiro Sugawara, David H. Hurley, Oliver B. Wright. Rev. of sci. instr., **77**, 043713 (2006).

**ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ НА ОСНОВЕ
ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНОК (ОБЗОР)**

****Ю.А. Порохонько, С.А. Шостаченко, Р.В. Захарченко, М.С. Бурдыкин***

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: y.porokhonko@mail.ru

AUTO-EMISSION CATHODES BASED ON GRAPHENE FILMS (REVIEW)

****Y.A. Porokhonko, S.A. Shostachenko, R.V. Zakharchenko, M.S. Burdykin***

National Research Nuclear University MEPhI
Russia, 115409, Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: y.porokhonko@mail.ru

Design and production technology of auto-emission cathodes based on graphene thin films are considered. Their properties and characteristics are studied and listed. We analyzed components of cathode-grid knots and described what each element is responsible for. Graphene has a number of advantages when used in manufacturing cathodes. Electron mobility can reach values up to $2 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ and the absorption of light is only 2.3%. All these qualities make graphene a perfect material for electron devices.

Ключевой проблемой вакуумной СВЧ-электроники является катодный узел с требуемой высокой плотностью эмиссионного тока, стабильностью и долговечностью. Широко используемые в вакуумной электронике термоэмиссионные катоды не позволяют выполнить требуемую в терагерцовом диапазоне миниатюризацию СВЧ-устройств (типоразмер катодного узла лампы бегущей волны на 300 ГГц – порядка 30 мкм) и решить проблему теплоотвода. Единственным решением проблемы является использование полевых эмиссионных катодов на основе графена.

Источник электронов (катод) является востребованными во многих устройствах электроники таких как: усилители высокой мощности, источники СВЧ излучения, источники рентгеновского излучения, дисплеи, катоды для электронной микроскопии. Использование холодных катодов является особо перспективным. В связи с чем материалы на основе графена [1-3] благодаря их уникальным структурным, электрическим и механическим свойствам рассматриваются как наиболее подходящие для изготовления полевых эмиттеров. Так, недавно было продемонстрировано, что устройства с полевыми эмиттерами на основе графена и оксида графена, содержащие большое количество краев, обладают улучшенными характеристиками. Наличие краев понижает работу выхода, что позволяет значи-

тельно уменьшить напряженность прикладываемого электрического поля для достижения порога эмиссии.

Графен обладает баллистическим транспортом на субмикронных масштабах, с релятивистскими скоростями носителей заряда. Подвижности носителей заряда в графене может достигать $2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [4]. Графен поглощает всего 2.3% света в видимом диапазоне, при этом обладая пренебрежительно малым коэффициентом отражения [5]. Высокая проводимость, механическая прочность и оптическая прозрачность обуславливает перспективность использования графена для создания прозрачных в оптическом диапазоне полевых эмиттеров.

Возможны вариации составного катода на базе автоэмиттера и умножителя потока электронов. В состав такого катода могут входить:

- автоэмиттер на основе матрицы алмазных острий, либо кремниевых острий, покрытых алмазной пленкой;
- вытягивающая сетка на основе графена;
- умножитель потока электронов на основе кремниевой решетки, покрытой алмазной поликристаллической пленкой;
- управляющая сетка на основе графена;
- умножитель-концентратор электронов.

Автоэмиттер служит для получения первичного потока электронов. Вытягивающая сетка дополнительно защищает катод от бомбардировки ионами и вытягивает электронный поток с катода. Умножитель потока увеличивает электронный поток на коэффициент не менее 20. Умножитель-концентратор соответственно концентрирует и умножает электронный пучок на коэффициент не менее 10. Так при исходном диаметре электронного пучка 1 мм диаметр пучка на выходе концентратора будет порядка 0.7 мм.

Использование конструкции составного катода, в состав которого входит один умножитель и один концентратор может обеспечить полный ток электронного пучка не менее 2 А при его диаметре около 0.7 мм. Добавление в конструкцию составного катода еще одного умножителя позволит увеличить полный ток не менее чем в 10 раз.

Литература

1. G. Eda et al., Appl. Phys. Lett., **93**, 233502 (2008).
2. U.A. Palnitkar et al., Appl. Phys. Lett., **97**, 063102 (2010).
3. Z.S. Wu et al., Adv. Mater., **21**, 1756(2009).
4. S.V. Morozov et al., Phys. Rev. Lett., **100**, 016602 (2008).
5. R.R. Nair et al., Science, **320**, 1308 (2008).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАНО-ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КЛЮЧЕЙ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

**Я.Б. Литун^{1,2}, О.В. Кононенко^{1,2}, М.В. Чичков²*

¹Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов, РАН
Россия, 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 6
e-mail: LitunY@yandex.ru

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF GRAPHENE BASED RF NEMS SWITCH

**Ya.B. Litun^{1,2}, O.V. Kononenko^{1,2}, M.V. Chichkov²*

¹Institute of Microelectronics and High Purity Materials, RAS
Russia, 142432, Chernogolovka, Moscow Region, Akademika Osip'yana str., 6

²National University of Science and Technology "MISIS"
Russia, 119049, Moscow, Leninsky prospect, 4

This report discusses some technological peculiarities of graphene-based RF NEMS. The attention is focused on graphene synthesis and transfer processes. RF NEMS general structure is shown and its operation principle is described. Combined method for graphene quality control, based on Raman spectroscopy and several AFM technologies, is proposed.

Графен является одним из наиболее перспективных материалов для создания новых приборов наноэлектроники. Его электрофизические и механические свойства дают основание предполагать, что он является подходящим кандидатом для применения в качестве мембраны нано-электромеханических систем, включая резонаторы, датчики давления и ключи (РЧ НЭМС). Отличительными особенностями РЧ НЭМС-ключей являются низкое управляющее напряжение, электростатический принцип работы и высокая скорость переключения, а их реализация возможна для применения как в микроволновых [1], так и в оптоэлектронных [2] устройствах.

Идея РЧ НЭМС ключей на основе графена с двусторонним закреплением мембраны была предложена еще в 2009 году [3], а кантилеверная структура (с односторонним закреплением) – в 2012 году [4].

Результаты полноволнового электромагнитного и механического моделирования РЧ НЭМС-ключа на основе графена [1] позволяют определить оптимальные размеры его топологии.

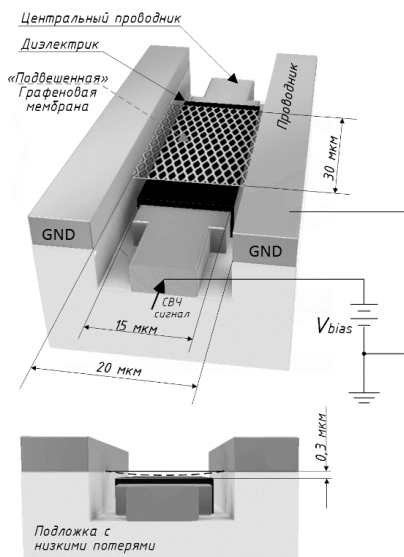


Рис. 1. Топология РЧ НЭМС ключа

На рис. 1 представлена топология РЧ НЭМС-ключа, который состоит из «подвешенной» графеновой мембраны, закреплённой над центральным проводником копланарного волновода.

Когда постоянное напряжение V_{bias} приложено между мембраной и сигнальным проводником, электростатические силы заставляют мембрану быстро опуститься на диэлектрическую поверхность, образуя низкоомный, преимущественно ёмкостной, путь для переменного тока на «землю».

Время переключения такого ключа составляет $0.24 \div 0.43$ мкс [1], т.е. на порядок быстрее известных типов МЭМС-ключей, для которых оно составляет 2 мкс и более.

Подытоживая полученные в [1] результаты, стоит отметить, что по сей день существует проблема повторяемости результатов. Для улучшения качества и повторяемости характеристик РЧ НЭМС-ключей, предлагается использовать интегральный способ оценки графеновой пленки, объединяющий в себе метод конфокальной микроскопии комбинационно-го рассеяния света и различные методы атомно-силовой микроскопии, в том числе метод зонда Кельвина. Таким образом, мы можем обеспечить всесторонний контроль качества удаления вспомогательной пленки при жидкостном переносе графена с жертвенной подложки, на которой производился синтез, и выбор наиболее однородных областей графеновой пленки необходимой толщины.

Литература

1. J. Perruisseau-Carrier, et al., IEEE Trans. on Nanotech., **1**(13), 70-79 (2014).
2. L. Abdollahi Shiramin, D. Van Thourhout, J. of Selected Topics in Quantum Electronics, **1**(23), 94-100 (2017).
3. M. Dragoman, et al., J. Appl. Phys., **105**, 054309 (2009).
4. P. Li, Z. You, T. Cui, J. Appl. Phys. Lett., **101**, 093111 (2012).

СОЗДАНИЕ МАССИВА ОДИНОЧНЫХ NV-ЦЕНТРОВ В СИНТЕТИЧЕСКОМ АЛМАЗЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЯ ПАМЯТИ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

**М.О. Смирнова^{1,2}, В.С. Бормашов³, Ю.В. Балакинин⁴, А.В. Голованов³, Н.И. Каргин¹,
О.В. Коровин^{1,2}, Н.С. Кукин^{1,2}, А.Г. Мурашов^{1,2}, С.В. Смуров^{1,2}, С.А. Тарелкин³,
А.А. Тимофеев¹, С. Трофимов³, А.А. Шемухин⁴*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: mosmironova@yandex.ru

²Межрегиональное общественное учреждение «Институт Инженерной Физики»
Россия, 142210, Московская обл., г. Серпухов, Б. Ударный пер., д. 1а

³Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов
Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, улица Центральная, дом 7а

⁴Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

THE CREATION OF ARRAY OF SINGLE NV-CENTERS IN A SYNTHETIC DIAMOND FOR THE DEVELOPMENT OF A QUANTUM COMPUTER MEMORY MODULE

**M.O. Smirnova^{1,2}, V.S. Bormashov³, U.V. Balakshin⁴, A.V. Golovanov³,
N.I. Kargin¹, O.V. Korovin^{1,2}, N.S. Kukin^{1,2}, A.G. Murashov^{1,2}, S.V. Smurov^{1,2},
S.A. Tarelkin³, A.A. Timofeev¹, S. Trofimov³, A.A. Shemuhin⁴*

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: mosmironova@yandex.ru

²Interregional public organization «Institute of Engineering Physics»
Russia, 142210, Moscow Region, Serpukhov, B. Udamy per., 1a

³Technological institute for superhard and novel carbon materials
Russia, 108840, Moscow, Troitsk, Tsentralnaya street, 7a

⁴Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU)
Russia, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskie gory, 1(2)

The nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond is a perspective candidate for a solid-state qubit and multi-qubit system. This paper presents the results of the study of formation of single NV-centers in a synthetic diamond. Diamond samples were obtained by temperature gradient method under high pressure and high temperature (HPHT). To form an array of single NV-centers a nickel mask was made. Helium ion implantation with subsequent high-temperature annealing was carried out. Optimum parameters of radiation were obtained by simulation the inhibition of helium ions in the nickel layer. After annealing, the fluorescence spectra and their autocorrelation functions in different growth sectors of these samples were investigated.

NV-центр в алмазе – это один из многочисленных точечных дефектов алмаза, состоящий из атома азота и вакансии. Особый интерес представляет отрицательно заряженный NV⁻центр, поскольку электрон находится рядом с вакансией и образует спиновую пару S=1 с одним из ее валентных

электронов, а кубиты, построенные на спине электрона, могут быть инициализированы и измерены с помощью возбуждения оптических переходов. Для разработки и эффективного управления многокубитной системы требуется создание массива одиночных NV-центров с заранее определенными координатами в кристалле.

В настоящей работе представлены результаты разработки технологии формирования одиночных NV-центров в синтетическом алмазе. Исследования проводились для алмазных пластин, полученных методом температурного градиента при высоком давлении и температуре (НРНТ) в ФГБНУ ТИСНУМ, с концентрацией азота $10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (в зависимости от ростового сектора). Исходя из литературного анализа основных методов получения одиночных NV-центров было решено произвести имплантацию тяжелых частиц (ионов) в алмазную монокристаллическую пластину. Их взаимодействие с кристаллической решеткой приводит к локальному образованию вакансий. Для достижения максимальной глубины имплантации следует использовать легкие ионы, например, протоны. Однако после имплантации они могут диффундировать в кристаллической решетке, образовывая скопления, которые разрушают поверхность пластины в процессе отжига (эффект «блистеринга»). В результате этого, для имплантации были выбраны ионы гелия. Для достижения локализации точек имплантации на алмазные пластины были нанесены металлические маски. В качестве материала для масок был использован никель, поскольку он обладает хорошими механическими свойствами, в том числе, адгезией и большим атомным числом, обеспечивающим эффективное торможение ионов при имплантации. Оптимальные параметры облучения (энергия и доза пучка) были определены с помощью моделирования торможения ионов гелия в слое никеля и составляют 50 кэВ и 10^{10} см^{-2} . Затем облученные пластины подвергались высокотемпературному отжигу, который способствует миграции вакансий и их объединению с атомом азота. Кристаллы отжигались при температурах 700 °С и 800 °С течение 30 минут.

После отжига были измерены спектры флуоресценции, построены автокорреляционные функции и исследованы зависимости этих параметров от ростовых секторов образцов. В результате было показано, что на скорость формирования NV-центров влияют свойства ростового сектора, в котором происходит имплантация.

Данные исследования были проведены в рамках договора № 574-381-1128а при финансовой поддержке НИЯУ «МИФИ».

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

– А –

Аверьянов Д.В., 30, 138
Аврамчук А.В., 38, 56, 98, 100
Акмаев М.А., 72, 74
Акмалов А.Э., 116
Аксенов Е.А., 116
Аксенов М.С., 40
Алексамян А.А., 114
Алешкини В.А., 72
Алещенко Ю.А., 72
Алтухов И.В., 28, 68
Амасев Д.В., 128
Аминев Д.Ф., 152
Андронов А.А., 66
Анистратенко С.С., 118, 120
Антонова Н.В., 38
Арапов Ю.Г., 12
Арустамян Д.А., 76
Афоненко А.А., 110

– Б –

Бабак Л.И., 126
Бабкин В.Г., 112
Бакаров А.К., 18
Балакшин Ю.В., 158
Балданов Б.Б., 150
Барышников Н.Б., 20
Белогорохов И.А., 146, 148
Белогорохова Л.И., 146, 148
Беляков В.А., 66
Боброва Е.А., 52
Богданов Е.В., 26
Большаков А.П., 28
Борисенко Д.П., 32
Борисюк П.В., 98
Бормашов В.С., 158
Бурбаев Т.М., 72
Бурдыкин М.С., 106, 154

– В –

Валишева Н.А., 40
Васильев Р.Б., 80, 82, 84
Васильевский И.С., 12, 20, 22, 38, 68, 70,
122, 124
Васильченко А.А., 14
Винченко А.Н., 12, 20, 22, 38, 68, 70,
122, 124
Вишняков Н.В., 132
Волков О.Ю., 110
Воронец Я.С., 90
Воропаев К.О., 42

– Г –

Галиев Г.Б., 96, 122
Гапоненко Н.В., 88, 132, 136
Гарбер Н.Г., 108
Гареев Г.З., 118, 120
Гаршев А.В., 82
Гаськов А.М., 82
Гергель В.А., 62, 64
Гиплинский А.М., 40
Гимальдинова М.А., 140, 142, 144
Гнатюк Д.Л., 60
Голованов А.В., 158
Голосов Д.А., 136
Горшкова Н.М., 62, 64
Гранько С.В., 90
Грехов М.М., 32, 38, 98
Гудина С.В., 12
Гусев А.С., 32, 58, 100

– Д –

Данилюк А.Л., 134
Дашкин Р.А., 34
Дмитриев Д.В., 40
Долбик А.В., 130
Долинский И.Ю., 142, 144
Дроздов К.А., 84

– Е –

Елисеев А.А., 104
Енишерлова К.Л., 52, 92, 94
Ермачихин А.В., 132

– Ж –

Желаннов А.В., 46
Жуков А.Е., 36
Журавлев К.С., 18, 40

– З –

Завадский С.М., 132
Задиранов Ю.М., 36
Зайцев А.А., 112
Захарченко Р.В., 38, 56, 106, 154
Зебрев Г.И., 34
Зиновьев С.А., 74
Зубов Ф.И., 36

– И –

Иванова Н.Е., 60
Иконников А.В., 66
Ильченко Е.В., 12
Ионов А.С., 42

– К –

Каган М.С., 28, 68
Казakov И.П., 74
Казакoва А.Е., 76
Казанский А.Г., 128
Капилин С.А., 52
Каратеев И.А., 30, 138
Каргин Н.И., 20, 22, 32, 38, 56, 58, 70, 98,
100, 102, 104, 130, 136, 140, 142, 144,
158
Карлова Д.А., 82
Карузский А.Л., 114
Катин К.П., 140, 142, 144
Клековкин А.В., 50, 54, 72, 74

Климов Е.А., 96, 122
Клоков А.Ю., 152
Клочков А.Н., 96, 122
Ковалевский А.А., 90
Ковальчук Н.Г., 32, 102, 104
Козлова Т.А., 130
Козловский В.Ф., 84
Козловский К.И., 116
Козюхин С.А., 128
Коколов А.А., 126
Колковский Ю.В., 52, 94
Колос В.В., 136
Комиссаров И.В., 32, 98, 102, 100, 104
Кондратьев О.А., 30, 138
Кононенко О.В., 156
Копылов В.Б., 96
Копытов Г.Ф., 14
Корнеев В.И., 92
Коровин О.В., 158
Королёв Н.А., 24
Королик О.В., 104
Котковский Г.Е., 116
Красильник З.Ф., 86
Крыжановская Н.В., 36
Кукин Н.С., 158
Кулагина М.М., 36
Кульгин Д.А., 78
Кухарев А.В., 134

– Л –

Лабунев В.А., 32, 98, 100, 130
Ладенков И.В., 66
Ладугин М.А., 66
Лазарук С.К., 130
Ле Динь Ви, 130
Лебедев А.И., 80, 84
Лебединский Ю.Ю., 98
Лешок А.А., 130
Литвинов В.Г., 132
Литун Я.Б., 156
Лукашин В.М., 16
Лунин Л.С., 76
Лунина М.Л., 76

Лучинин В.В., 116
Лютцау А.В., 94, 92

– М –

Макаров А.В., 108
Максимов Е.М., 116
Максимов М.В., 36
Мальшев С.А., 40
Мальцев П.П., 122
Маремьянин К.В., 66
Мармалюк А.А., 66
Мартынов Я.Б., 16
Маслов М.М., 140, 142, 144
Микитчук К.Б., 40
Минина Н.Я., 26
Минкин В.С., 62, 64
Митягин Ю.А., 114, 116
Михалевич В.Г., 128
Михалик М.М., 98, 100, 102, 104
Моисеев Э.И., 36
Мудрый А.В., 88
Муратов А.В., 72
Мурашов А.Г., 158
Мурзин В.Н., 114

– Н –

Неверов В.Н., 12
Нигериш К.А., 100, 102, 104
Никеров Д.В., 24
Никитенко В.Р., 24, 132
Новиков А.В., 72, 86
Новиков В.А., 108
Новиков Н.В., 142, 144
Новиков С.И., 16
Ноздрин Ю.Н., 66
Номоев А.В., 150
Номоев С.А., 38, 124

– П –

Павлов А.Ю., 48, 50, 54, 62
Павлов В.Ю., 48, 50, 54
Павловский В.В., 110
Падалица А.А., 66

Папроцкий С.К., 28, 68
Парфёнов О.Е., 30, 138
Пашковский А.Б., 16
Пересторонин А.В., 114
Петров А.В., 42
Петров И.И., 126
Плеханов А.А., 116
Подгорных С.М., 12
Позднякова В.И., 66
Пономарев Д.С., 110
Порохонько Ю.А., 56, 106, 154
Прищела С.Л., 102, 134
Протасов Д.Ю., 18
Пушкарев С.С., 122
Пушкарёв С.С., 96

– Р –

Райчёнок Т.Ф., 88
Ральченко В.Г., 28
Родионов Н.Б., 28
Романов Р.И., 100
Ромась Л.М., 108
Руденко М.В., 88, 132
Русак Т.Ф., 92
Рыжук Р.В., 38, 56, 140, 142, 144
Рындя С.М., 58

– С –

Савельев А.П., 12
Садкофьев Ю.Г., 72
Саиджонов Б.М., 80, 84
Сарайкин В.В., 92
Сафаралиев Г.К., 58
Сафонов Д.А., 22, 70
Селезнев Б.И., 42, 44, 46
Сергеев С.М., 86
Сибирмовский Ю.Д., 20, 70
Сиглова Н.В., 58
Скороходов Е.В., 86
Слаповский Д.Н., 48, 50
Случинская И.А., 80
Смирнова М.О., 158
Смуров С.В., 158

Соболев А.С., 62, 64
Соколов И.С., 30, 138
Солянкин П.М., 122
Сохраби Анараки Х., 136
Степихова М.В., 86
Сторчак В.Г., 30, 138
Стриханов М.Н., 32, 38, 56, 58, 70, 98, 100
Строгова А.С., 90
Сукалин К.С., 88
Султанов А.О., 58, 100

– Т –

Талденков А.Н., 30, 138
Тарасов М.А., 62, 64
Тарелкин С.А., 158
Темпер Э.М., 52, 94
Тиванов М.С., 104
Тимофеев А.А., 56, 58, 158
Токмачёв А.М., 30, 138
Томош К.Н., 50, 54
Торопов А.И., 18, 40
Торхов Н.А., 108, 126, 150
Трофимов С., 158
Трошков С.И., 36

– У –

Ушаков В.В., 72
Ушаков Д.В., 110

– Ф –

Федоров Д.Г., 44
Федоров Ю.В., 54
Фефелов А.Г., 66
Филимонова И.Д., 108
Фоминский В.Ю., 100

– Х –

Хабибуллин Р.А., 62, 110, 112
Хвальковский Н.А., 68
Хмельницкий Р.А., 28

Холов П.А., 136
Хомич А.А., 84
Хорошко Л.С., 88

– Ц –

Цветков В.А., 74, 152
Цховребов А.М., 114

– Ч –

Черняев А.П., 114
Черняков П.О., 34
Чиж А.Л., 40
Чистохин И.Б., 40
Чистяков А.А., 116
Чичков М.В., 156

– Ш –

Шалеев М.В., 86
Шарков А.И., 152
Шевченко А.А., 136
Шейдакова К.В., 88
Шелушинина Н.Г., 12
Шемухин А.А., 158
Шкуринов А.П., 122
Шостаченко С.А., 56, 38, 106, 154

– Щ –

Щаврук Н.В., 60, 110, 112

– Ю –

Юнин П.А., 72
Юрасов Д.В., 72

– Я –

Яблонский А.Н., 86
Якунин М.В., 12

– L –

Le Normand F., 134

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

9-я Международная научно-практическая конференция
по физике и технологии
наногетероструктурной СВЧ-электроники

23 мая 2018 года

СБОРНИК ТРУДОВ

Подписано в печать 04.05.2018. Формат 60×84 1/16.
Печ.л. 10,25. Тираж 130 экз. Заказ № 56.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ.*

115409, Москва, Каширское ш., 31