

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

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

15-16 мая 2019 года

СБОРНИК ТРУДОВ

МОСКВА

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

Мокировские чтения. 10-я Юбилейная Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 15-16 мая 2019 г.: сборник трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. – 204 с.

Юбилейная конференция по физике и технологии гетероструктурной СВЧ-электроники в 2019 году проводится в 10 раз и посвящена памяти выдающегося физика, члена-корреспондента РАН, основателя советской и российской научной школы в области гетероструктурной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники Владимира Григорьевича Мокирова.

Тематика конференции объединила работы ведущих исследователей из России и стран СНГ по целому ряду научно-технических и технологических задач в области гетероструктурной СВЧ-электроники и смежных областей. Это разделы: фундаментальные аспекты наногетероструктурной СВЧ-электроники; полупроводниковые СВЧ-приборы и устройства: производство, технологии и свойства; перспективные материалы, гетероструктуры и сверхрешетки, двумерные, одномерные и нульмерные структуры; структурные свойства и нанометрология наносистем и гетероструктур; терагерцевая электроника и фотоника; функциональная электроника; оптоэлектроника и радиофотоника.

Материалы докладов подготовлены сотрудниками различных учреждений: институтов РАН, представителями производственных организаций и университетов 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.

Конференция проводится ежегодно при участии Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Фонда поддержки науки и образования имени В.Г. Мокирова, Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокирова РАН.

Сайты конференции: www.mokirov.ru (раздел «Конференции»)
<https://mokirov.mephi.ru/>

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
www.mephi.ru

Фонд поддержки образования и науки имени члена-корреспондента РАН, профессора В.Г. Мокирова:
www.mokirov.ru

Федеральное государственное автономное научное учреждение
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
имени В.Г. Мокирова Российской академии наук
www.isvch.ru

Материалы получены до 1 апреля 2019 г. Сборник трудов издается в авторской редакции

ISBN 978-5-7262-2564-7

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2019

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРНОЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

ГУДИНА С.В., АРАПОВ Ю.Г., ДЕРЮШКИНА Е.В., НЕВЕРОВ В.Н., САВЕЛЬЕВ А.П., ПОДГОРНЫХ С.М., ШЕЛУШИНИНА Н.Г., ЯКУНИН М.В., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н.	
Активационная проводимость в режиме квантового эффекта Холла в квантовых ямах InGaAs/InAlAs с высоким содержанием InAs.....	11
ЗАБОЛОТНЫХ А.А., ВОЛКОВ В.А.	
Плазмоны в 2D электронной системе с затвором в виде полосы	13
ТОРХОВ Н.А.	
Перенос квантово-механического состояния системы в эффектах туннелирования	15
ТОРХОВ Н.А., МАКАРОВ А.В., НОВИКОВ В.А.	
Размерные эффекты в электростатической системе плоских p ⁺ -n – кремниевых переходах	17
ИВАНОВА Я.В., ЗУБКОВ В.И.	
Численный расчет параметров резонансно-туннельных структур	19
БОГДАНОВ Е.В., МИНИНА Н.Я.	
Влияние одноосного сжатия на двумерные электроны на гетерогранице n-GaAs/AlGaAs: Si	21
ВАСИЛЬЧЕНКО А.А.	
Высокотемпературная электронно-дырочная жидкость в пленках алмаза	23
ЗАГОРОДНЕВ И.В., РОДИОНОВ Д.А.	
Возбуждение магнитоплазмонов в неограниченном двумерном электронном газе электромагнитным излучением	25
МЕХИЯ А.Б., КАЗАКОВ А.А., АРОНЗОН А.Б., ОВЕШНИКОВ Л.Н., ДАВЫДОВ А.Б., РИЛЬ А.И., МАРЕНКИН С.Ф.	
Квантовые поправки и магнитотранспорт в 3D дираковском полуметалле Cd _{3-x} Mn _x As ₂	27

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА: ПРОИЗВОДСТВО, ТЕХНОЛОГИИ И СВОЙСТВА

КРАСОВИЦКИЙ Д.М., ФИЛАРЕТОВ А.Г., ЧАЛЫЙ В.П.	
Физико-технологические аспекты построения FOUNDRY производства СВЧ ЭКБ: опыт АО "СВЕТЛАНА-РОСТ"	29
ВЕЛИКОВСКИЙ Л.Э., СИМ П.Е., ДЕМЧЕНКО О.И., КУРБАНОВА Н.Е., САХАРОВ А.В., ЛУНДИН В.В., ЗАВАРИН Е.Е., ЗАКГЕЙМ Д.А., ЦАЦУЛЬНИКОВ А.Ф., АРТЕЕВ Д.С., ЯГОВКИНА М.А., АКСЕНОВ А.А., КУРИКАЛОВ В.В.	
Разработки и исследования СВЧ транзисторов на основе AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур	33

ЕНИШЕРЛОВА К.Л., МЕДВЕДЕВ Б.К., КОЛКОВСКИЙ Ю.В., ТЕМПЕР Э.М., КОРНЕЕВ В.И.	
Деградация омических контактов AlGaIn/GaN НЕМТ, связанная с морфологией поверхности	37
ПАВЛОВ В.Ю., ПАВЛОВ А.Ю., СЛАПОВСКИЙ Д.Н.	
Влияние нагрева на контактное сопротивление несплавных омических контактов к нитридным гетероструктурам	39
ЗАХАРЧЕНКО Р.В., ШОСТАЧЕНКО С.А., БУРДЫКИН М.С., ПОРОХОНЬКО Ю.А., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И.	
Физико-технологические особенности формирования омических контактов для полупроводниковых приборов на основе GaN	41
ВАСИЛЬЕВ П.С., ДРАГУТЬ М.В., КУЗЬМИН Е.В., УСИК Д.А.	
Разработка технологии формирования сквозных отверстий в GaAs при помощи плазмохимического травления	43
СМИРНОВ Ю.Ю., ДРАГУТЬ М.В., МИШАРИН Д.М.	
Влияние пассивирующих свойств диэлектрических плёнок на дрейф параметров арсенид-галлиевых МИС и транзисторов	45
ПАВЛОВ А.Ю., ТОМОШ К.Н., ГАЛИЕВ Р.Р., ПАВЛОВ В.Ю., ЗУЕВ А.В.	
Исследование полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/AlIn/GaN с подзатворным заглублением	47
ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИННИЧЕНКО А.Н., АНТОНОВА Н.В., АВРАМЧУК А.В., ЗАХАРЧЕНКО Р.В., БУРДЫКИН М.С., ЛИТУН Я.Б., РЫЖУК Р.В., ГОРЕЛОВ А.А., КАРГИН Н.И., СТРИХАНОВ М.Н.	
Разработка малошумящих РНЕМТ и МНЕМТ 0,15 мкм транзисторов НИЯУ МИФИ	49
ГОРЕЛОВ А.А., КАРГИН Н.И., РЫЖУК Р.В.	
Проектирование двухкаскадного СВЧ усилителя мощности методом LOAD-PULL	51
ЗОЛОТАРЕВ А.А.	
Повышение надежности СВЧ GaN устройств при применении металломатричного композита AlSiC	53
ЧЕРНОДУБОВ Д.А., ИНЮШКИН А.В.	
Теплоперенос в тонкопленочных структурах нитрида галлия	55
ЖЕЛАННОВ А.В., ПЕТРОВ М.Н., СЕЛЕЗНЕВ Б.И., ФЕДОРОВ Д.Г.	
Моделирование диодов Шоттки с ионно-легированными слоями на нитриде галлия	57
ЖЕЛАННОВ А.В., ИОНОВ А.С., СЕЛЕЗНЕВ Б.И., ФЕДОРОВ Д.Г.	
Омические контакты с ионно-легированными подконтактными слоями к приборным структурам на основе нитрида галлия	59
СЛАПОВСКИЙ Д.Н., ПАВЛОВ А.Ю., ПАВЛОВ В.Ю., КЛЕКОВКИН А.В., МАЙТАМА М.В.	
Исследование характеристик НЕМТ AlGaIn/GaN со сплавными омическими контактами на основе Si/Al	61

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И СВЕРХРЕШЕТКИ,
ДВУМЕРНЫЕ, ОДНОМЕРНЫЕ И НУЛЬМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ

ПРОТАСОВ Д.Ю., ДМИТРИЕВ Д.В., ГУЛЯЕВ Д.В., ЖУРАВЛЕВ К.С., ЮЩЕНКО Г.И., АЙЗЕНШТАТ А.Ю.	
Влияние конструкции и уровня легирования гетероструктур РНЕМТ на свойства ключевых транзисторов.....	63
ВИНИЧЕНКО А.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ПУШКАРЕВ С.С., КАРГИН Н.И.	
Эпитаксия и свойства метаморфных МНЕМТ гетероструктур с буферным слоем InAlAs и содержанием InAs в КЯ от 20 до 100 %	65
САФОНОВ Д.А., ВИНИЧЕНКО А.Н., КАРГИН Н.И., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С.	
Температурные зависимости подвижности электронов в РНЕМТ гетероструктурах с составным спейсерным слоем, содержащим нанослой AlAs.....	67
ПЕТРОВ С.И., АЛЕКСЕЕВ А.Н., МАМАЕВ В.В., НОВИКОВ С.А., ЛУЦЕНКО Е.В., РЖЕУЦКИЙ М.В.	
Использование высокотемпературной аммиачной МЛЭ для улучшения свойств нитридных НЕМТ гетероструктур.....	69
ПАЩЕНКО А.С., ЛУНИН Л.С., АЛФИМОВА Д.Л., ЛУНИНА М.Л., ДАНИЛИНА Э.М., ПАЩЕНКО О.С.	
Висмутосодержащие тонкие пленки изопериодные бинарным подложкам AlP/BV	71
СТРОГОВА А.С., КОВАЛЕВСКИЙ А.А., ГРАНЬКО С.В., ВОРОНЕЦ Я.С.	
Влияние легирования редкоземельными элементами и германием на структуру и свойства наноструктурированных пленок кремния.....	73
БОРИСЕНКО Д.П., ГУСЕВ А.С., КОМИССАРОВ И.В., КАРГИН Н.И., ЛАБУНОВ В.А., КОВАЛЬЧУК Н.Г.	
Влияние буферного слоя ALN на эпитаксиальный рост GaN на графене	75
АВРАМЧУК А.В., МИХАЛИК М.М., КОМИССАРОВ И.В., КАРГИН Н.И., ЛАБУНОВ В.А.	
Исследование влияния полимерного слоя на концентрацию носителей заряда в эпитаксиальном графене на карбиде кремния.....	77
АВЕРЬЯНОВ Д.В., СОКОЛОВ И.С., ТОКМАЧЁВ А.М., КАРАТЕЕВ И.А., ТАЛДЕНКОВ А.Н., ПАРФЁНОВ О.Е., ТИХОМИРОВ С.А., СТОРЧАК В.Г.	
Синтез и свойства сверхтонких слоев интеркалированного германена.....	79
ЧУБЕНКО Е.Б., БАГЛОВ А.В., ЛИСИМОВА Е.С., БОРИСЕНКО В.Е.	
Синтез и люминесцентные свойства графитоподобного нитрида углерода и гетероструктур на его основе	81
ПРИЩЕПА С.Л., ДАНИЛЮК А.Л., КОМИССАРОВ И.В.	
Магнитная релаксация в нанокompозитах на основе УНТ	83
БАРАНОВА М.С., СТЕМПИЦКИЙ В.Р.	
Обменное магнитное взаимодействие в монослоях $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ и $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$	85
СОКОЛОВ И.С., АВЕРЬЯНОВ Д.В., КАРАТЕЕВ И.А., ТОКМАЧЁВ А.М., ПАРФЁНОВ О.Е., ТАЛДЕНКОВ А.Н., СТОРЧАК В.Г.	
Магнетизм интеркалированного графена и поверхностных фаз	87

КАРАТЕЕВ И.А., СОКОЛОВ И.С., АВЕРЬЯНОВ Д.В., ТАЛДЕНКОВ А.Н., ТОКМАЧЁВ А.М., ПАРФЁНОВ О.Е., СТОРЧАК В.Г.	
Структурные и магнитные свойства тонких пленок $GdGe_2$	89
ЛЕБЕДЕВ А.И., СЛУЧИНСКАЯ И.А.	
Синтез и свойства коллоидных нанопластинок TiO_2 , легированных 3d элементами	91
КУРТИНА Д.А., ГАРШЕВ А.В., ШУБИН В.В., ВАСИЛЬЕВ Р.Б.	
Экситонный круговой дихроизм атомно-тонких коллоидных наночастиц $CdSe$	93
ТАБУЛИНА Л.В., МИХАЛИК М.М., ШАМАН Ю.П., КОМИССАРОВ И.В.	
Влияние глубокого измельчения пиролитического графита на кристаллическую структуру его хлопьев и синтез из них оксида графена	95
КОВАЛЬЧУК Н.Г., НИГЕРИШ К.А., ФЕЛЬШЕРУК А.В., СВИТО И.А., ТАМУЛЕВИЧЮС Т., ТАМУЛЕВИЧЮС С., КАРГИН Н.И., КОМИССАРОВ И.В., ПРИЩЕПА С.Л.	
Формирование микроструктур из двухслойного графена на подложке SiO_2/Si фемтосекундным лазером	97
БАГЛОВ А.В., ХОРОШКО Л.С.	
Зонная структура графитоподобного нитрида углерода	99
ГВОЗДОВСКИЙ Д.Ч., СТЕМПИЦКИЙ В.Р.	
Взаимодействие графена с поверхностью нитрида кремния: квантово-механическое моделирование	101
БАГЛОВ А.В., ЧУБЕНКО Е.Б., ГНИТЬКО А.А., ЛИСИМОВА Е.С.	
Структурные свойства графитоподобного нитрида углерода, полученного методом пиролитического разложения тиомочевины	103
ЛОЗОВЕНКО А.А., ПОЗНЯК А.А., ГОРОХ Г.Г.	
Особенности электрохимического формирования нанопроводов $InSb$ в пористых матрицах с большим аспектным отношением	105
ЗОТОВ А.О., КИСЛИЦИН М.В., ПЕРЕВАЛОВ А.А.	
Исследование электрических свойств сверхтонких пленок ZnO , полученных различными методами нанесения	107
ШАРКОВ А.И., КЛОКОВ А.Ю., ХМЕЛЬНИЦКИЙ Р.А., ЦВЕТКОВ В.А., ЕВЛАШИН С.А.	
Дифракционный режим распространения когерентных фононов гиперзвуковых частот в пластинах алмаза при комнатных температурах	109
СМИРНОВА М.О., БУХТИЯРОВ А.А., ГОЛОВАНОВ А.В., КОРОВИН О.В., ТАРЕЛКИН С.А., ТРОФИМОВ С.Д.	
Формирование NV-центра в алмазе: молекулярно-динамическое моделирование с помощью неортогональной модели сильной связи	111
МЕРИНОВ В.Б., КАТИН К.П., ГРИШАКОВ К.С., МАСЛОВ М.М., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И.	
Структура и устойчивость высокоэнергетических замкнутых азотных систем	113

МЕТЕЛЬ Ю.В., НИКИТЕНКО В.Р., БУРДАКОВ Я.В. Аналитическая модель транспорта поляронов в неупорядоченных органических материалах	115
ГИМАЛЬДИНОВА М.А., КАТИН К.П., ГРИШАКОВ К.С., МАСЛОВ М.М., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И. Энергетические и электрические характеристики кремниевых полипризматических структур	117
НИКИТЕНКО В.Р., АМРАКУЛОВ М.М. Транспорт носителей заряда в неупорядоченных органических материалах с примесями	119
САЛЕМ М.А., КАТИН К.П., МАСЛОВ М.М. Теоретическое исследование электронных и оптических свойств фуллеренов, допированных кремнием	121

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА И НАНОМЕТРОЛОГИЯ НАНОСИСТЕМ И ГЕТЕРОСТРУКТУР

КОНЦЕВОЙ Ю.А., КОРНЕЕВ В.И., МЕДВЕДЕВ Б.К. Методы контроля качества диэлектрических пленок	123
ДОБРОХОТОВ П.Л., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИННИЧЕНКО А.Н., САРАЙКИН В.В., ПУШКАРЕВ С.С. Развитие методики калибровки состава и толщины слоев AlGaAs эпитаксиальных гетероструктур с помощью метода высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии	125
ПУШКАРЕВ С.С., КОПЫЛОВ В.Б., САРАЙКИН В.В. Усиление «жёлтой» катодолуминесценции GaN-структуры под действием пучка низкоэнергетических электронов	127
ХОРОШКО Л.С. Исследование структуры замещенных иттрий-алюминиевых перовскитов	129
СУЛТАНОВ А.О., ГУСЕВ А.С., СИГЛОВАЯ Н.В., КАРГИН Н.И., САФАРАЛИЕВ Г.К., РЫНДЯ С.М., РЫЖУК Р.В. Релаксация напряжений несоответствия в гетероструктурах 3C-SiC/Si	131
СЕРЕДИН Б.М., ЗАЙЧЕНКО А.Н., СИМАКИН С.Г., ЛОМОВ А.А. Особенности определения концентрации легирующей примеси в термомиграционных каналах кремния	133
БАКУН А.Д., ГУСЕВ А.С., КАРГИН Н.И., РЫНДЯ С.М., СИГЛОВАЯ Н.В. Исследование особенностей обработки поверхности оптической стеклокерамики пучком кластерных ионов и ускоренных нейтральных атомов	135

ТЕРАГЕРЦОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА

ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЩАВРУК Н.В., ПОНОМАРЕВ Д.С., УШАКОВ Д.В., АФОНЕНКО А.А., ВОЛКОВ О.Ю., ПАВЛОВСКИЙ В.В.	
Спектры излучения ТГц квантово-каскадных лазеров на основе резонансно-фононного дизайна	137
ЛАВРУХИН Д.В., ГЛИНСКИЙ И.А., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЯЧМЕНЕВ А.Э., ПАВЛОВ А.Ю., ГАЛИЕВ Р.Р., ГОНЧАРОВ Ю.Г., СПЕКТОР И.Е., ЗАЙЦЕВ К.И., ПОНОМАРЕВ Д.С.	
Генерация излучения терагерцовыми антеннами с высоко-аспектными плазмонными решетками	139
КЛОЧКОВ А.Н., СОЛЯНКИН П.М., КЛИМОВ Е.А., ПУШКАРЕВ С.С., ШКУРИНОВ А.П., ГАЛИЕВ Г.Б.	
Импульсные ТГц-излучения от поверхности эпитаксиальных структур на основе низкотемпературного GaAs (111)A.....	141
ШКУРИНОВ А.П., БАЛАКИН А.В., ГАРНОВ С.В., МАКАРОВ В.А., КУЗЕЧКИН Н.А., ОБРАЗЦОВ П.А., СОЛЯНКИН П.М.	
Нелинейное вращение плоскости поляризации эллиптически поляризационного терагерцового излучения в жидком азоте	143
ГАРЕЕВ Г.З., АНИСТРАТЕНКО С.С.	
Терагерцовые телекоммуникации и квантовая криптография.....	147
АЛЕКСАНИЯ А.А., ЖЕРИХИНА Л.Н., КАРУЗСКИЙ А.Л., МИТЯГИН Ю.А., МУРЗИН В.Н., ПЕРЕСТОРОНИН А.В., ЧЕРНЯЕВ А.П.	
Эффекты процессов внутреннего усиления в терагерцовых резонансно-туннельных наноструктурах на основе GaAs/AlAs	149
ГЕРГЕЛЬ В.А., ГОРШКОВА Н.М., СОБОЛЕВ А.С., МИНКИН В.С.	
Продвинутая модель расчета электрических характеристик мультислойных AlGaAs/GaAs структур сложной архитектуры.....	151
ГЕРГЕЛЬ В.А., ГОРШКОВА Н.М., СОБОЛЕВ А.С., МИНКИН В.С., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ПАВЛОВ А.Ю.	
Особенности терморелаксации квазистатических вольт-амперных характеристик мультислойных AlxGa1-xAs гетероструктур при импульсном питании	153
ЛАВРУХИН Д.В., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЯЧМЕНЕВ А.Э., ПАВЛОВ А.Ю., ГОНЧАРОВ Ю.Г., СПЕКТОР И.Е., ЗАЙЦЕВ К.И., ПОНОМАРЕВ Д.С.	
Управление спектром генерации терагерцовой фотопроводящей антенны с помощью частотно-зависимой модуляции импеданса	155
ГЛИНСКИЙ И.А., ЛАВРУХИН Д.В., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЯЧМЕНЕВ А.Э., ПАВЛОВ А.Ю., ЗЕНЧЕНКО Н.В., ПОНОМАРЕВ Д.С.	
Разработка технологии создания фотопроводящих антенн с пассивирующим диэлектриком.....	157
ГАРЕЕВ Г.З., АНИСТРАТЕНКО С.С.	
Широкополосная терагерцовая генерация в водной среде: прикладные аспекты	159

НОМОЕВ С.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н. Разработка и изготовление фотопроводящей антенны с применением встречно-штыревой структуры	161
АКМАЛОВ А.Э., КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КРЮКОВА И.С., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А. Исследование спектральных характеристик фотонных кристаллов на основе пористого кремния в терагерцовом диапазоне	163

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ЭТРЕКОВА М.О., ЛИТВИНОВ А.В., САМОТАЕВ Н.Н., КОРОЛЕВ Н.А. Вольт-фарадные характеристики и механизм чувствительности газовых сенсоров на основе МДП-структур	165
ЖУКОВ К.В. Система акустического контроля прохождения поршня для автоматического контроля движения внутритрубного инспекционного снаряда	167
ПРИЩЕПА С.Л., КУШНИР В.Н. Каналирование триплетных пар в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик	169
КОЛЕДОВ В., ШАВРОВ В., ШЕЛЯКОВ А., БОРОДАКО К., ИРЖАК А., ЛЕГА П., ОРЛОВ А., ФРОЛОВ А.В., СМОЛОВИЧ А. Трехмерное наноманипулирование с применением микроинструментов с эффектом памяти формы для технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники	171
ПЛИГОВКА А.Н., ГОРОХ Г.Г. Формирование металлооксидных наносеток анодированием двухслойной системы Al/Nb	173
КАРГИН И.И., <u>ВОЛКОВ Н.В.</u> , БУЛЫЧЕВ И.Г., СЫСОЕВА Н.В., ТИМОШЕНКОВ С.П., ТИМОШЕНКОВ А.С. Разработка элементов МЭМС наноразмерного диапазона для СВЧ устройств с использованием FIB технологии	175
ЛИТУН Я.Б., ЛИТУН В.И., КОНОНЕНКО О.В., ПАРХОМЕНКО Ю.Н., ЧИЧКОВ М.В. Исследование характеристик графенового НЭМС-ключа на полужолирующей подложке	179

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОФОТОНИКА ЭЛЕКТРОНИКА

ВОРОПАЕВ К.О., СЕЛЕЗНЕВ Б.И., ИОНОВ А.С. Формирование апертуры вертикально-излучающего лазера с длиной волны генерации 1550 нм	181
АРУСТАМЯН Д.А., ЛУНИН Л.С., ЛУНИНА М.Л., КАЗАКОВА А.Е. Получение гетероструктур AlInGaPAs/InP для фотоприемников ближнего ИК-диапазона	183

СИБИРМОВСКИЙ Ю.Д., КАРГИН Н.И., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С. Моделирование оптических свойств квантовых ям и сверхрешеток для электрооптических модуляторов	185
ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н., СИБИРМОВСКИЙ Ю.Д., ДОБРОХОТОВ П.Л., ЛАДУГИН М.А., МАРМАЛЮК А.А., РЯБОШТАН Ю.Л., КАРГИН Н.И., СТРИХАНОВ М.Н. Разработка структур с МКЯ InAlGaAs на подложке InP для приложений интегральной радиофотоники, выращенных комбинированным способом МВЕ/МОСVD	187
БУТАЕВ М.Р., АНДРЕЕВ А.Ю., БАГАЕВ Т.А., ГАМОВ Н.А., ГЛАДЫШЕВ Н.И., ЗВЕРЕВ М.М., КОЗЛОВСКИЙ В.И., СКАСЫРСКИЙ Я.К., ЯРОЦКАЯ И.В. Исследование полупроводникового дискового лазера на структуре InGaAs/GaAs при накачке электронным пучком	189
ЛАЗАРУК С.К., ЛЕШОК А.А., ЛЕ ДИНЬ ВИ, ДОЛБИК В.В., ЛАЗАРУК А.С., КЛОПОЦКИЙ А.В., ПЕРКО С.Л., ЛАБУНОВ В.А. Кремниевые лавинные светодиоды и оптические межсоединения на их основе	192
АСЛАНЯН А.Э., АВАКЯНЦ Л.П., ЧЕРВЯКОВ А.В., ТУРКИН А.Н., МАЗАЛОВ А.В., КУРЕШОВ В.А., САБИТОВ Д.Р., МАРМАЛЮК А.А. Планарный алюмооксидный волновод для кремниевых оптических межсоединений фотореверсивный ток в светодиодных гетероструктурах на основе InGaN/GaN зелёного свечения с разным количеством квантовых ям в активной области	194
ГОРДЕЕВ В.П., БЕЗОТОСНЫЙ В.В., ОЛЕЩЕНКО В.А. Перспективы применения алмазных и AlN теплоотводящих элементов в мощных оптоэлектронных приборах на основе гетероструктур A_3B_5	196
Именной указатель авторов	200

**АКТИВАЦИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В РЕЖИМЕ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА
ХОЛЛА В КВАНТОВЫХ ЯМАХ InGaAs/InAlAs С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ InAs**

**С.В. Гудина¹, Ю.Г. Арапов¹, Е.В. Дерюшкина¹, 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. Михеева УрО РАН,
620108, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, Россия, svpopova@imp.uran.ru

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

**ACTIVATED CONDUCTIVITY IN THE QUANTUM HALL REGIME IN THE In-
GaAs/InAlAs QUANTUM WELLS WITH HIGH InAs CONTENT**

**S.V. Gudina¹, Yu.G. Arapov¹, E.V. Deriushkina¹, V.N. Neverov¹, A.P. Savelyev¹,
S.M. Podgornykh¹, N.G. Shelushinina¹, M.V. Yakunin¹, I.S. Vasil'evskii², A.N. Vinichenko²*

¹ M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
S. Kovalevskaya str. 18, 620108, Yekaterinburg, Russia, svpopova@imp.uran.ru

² National 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 12 T and temperature from 0.3 to 35 K in the n-In_yGa_{1-y}As/In_xAl_{1-x}As structures with high InAs content are measured. Indications pointing out the significant role of spin-orbit interaction for the values of the charge carrier parameters and in localization – delocalization processes are obtained.

В классических полупроводниковых структурах на основе $A_{III}B_V$ поиск путей повышения проводимости и управления незарядовыми степенями свободы, такими как, спин, эффективная масса и процессы рассеяния носителей тока, остается актуальным как с фундаментальной точки зрения исследования свойств низкоразмерных систем, так и для технологических применений. Так, интерес к структурам InGaAs/InAlAs связан с разработкой квантовых каскадных лазеров, быстродействующих транзисторов и других элементов полупроводниковой электроники и спинорбитроники.

Возникновение плато с квантованными значениями холловского сопротивления $\rho_{xy}(B)$ при соответствующем уменьшении значений продольного сопротивления ρ_{xx} связано с существованием вызванных беспорядком щелей подвижности в плотности состояний двумерной (2D) системы в сильном магнитном поле. Когда уровень Ферми в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) оказывается в щели между соседними уровнями Ландау, наблюдается термоактивационное поведение ρ_{xx} бла-

годаря возбуждению электронов в узкую полосу делокализованные состояний (шириной Γ) вблизи середины уширенного беспорядком уровня Ландау. Использование метода термоактивационной проводимости, наряду с анализом осцилляционной картины магнитосопротивления, является эффективным методом восстановления энергетического спектра 2D электронного газа в квантующих магнитных полях и определения параметров носителей заряда.

Исследованы продольные ρ_{xx} и холловские ρ_{xy} сопротивления двух групп МНЕМТ-гетероструктур $n\text{-In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, отличающихся составом слоев ($x = 0.82; 0.81; y = 0.85; 0.90$) и ширинами слоев (спейсер 7.2; 12 нм) в магнитных полях, B , до 12 Тл и температурах T от 0.3 до 35 К. Параметры носителей заряда определены из анализа осцилляций магнитосопротивления: концентрация $n = (4.6; 6.8) \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$, подвижность $\mu = (9; 20) \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, эффективная масса $m^* = (0.036; 0.037)m_0$, квантовое время жизни $\tau_q = (5; 9) \cdot 10^{-14} \text{ с}$.

В исследованных образцах при достаточно высоких температурах, $T = (10 \div 30) \text{ К}$, в области нечетных факторов заполнения, $\nu = 5, 7, 9$, наблюдается явно выраженная П-образная (box-like в терминах работы [1]) форма кривых σ_{xx} в интервале магнитных полей ΔB , охватывающем два спин-расщепленных пика, и быстро спадает вне этого интервала. При понижении температуры для каждого фактора заполнения ($\nu = 3, 5, 7, 9$) формируется два отдельных (уширенных) пика. Сочетание наблюдаемого П – образного поведения зависимости $\sigma_{xx}(B)$ для нечетных факторов заполнения при $T \leq 10 \text{ К}$ с “классическим” типом расходимости радиуса локализации, $\xi(T) \sim (T/T_0)^{4/3}$, при $T \approx (1 \div 10) \text{ К}$ свидетельствует о существенной роли спин-орбитального взаимодействия в процессах локализации – делокализации носителей в исследованной системе $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$.

Анализ термоактивационной проводимости в квантующих магнитных полях позволил оценить величину g-фактора электронов, большие значения которого могут свидетельствовать в пользу необходимости учета обменного усиления и спин-орбитального расщепления [2].

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

Литература

1. D.G. Polyakov and M.E. Raikh, Phys. Rev. Lett., **75**, 1368 (1995).
2. С.С. Криштопенко, К.П. Калинин, В.И. Гавриленко, Ю.Г. Садофьев, М. Goiran, ФТП, **46**, 1186 (2012).

ПЛАЗМОНЫ В 2D ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ С ЗАТВОРОМ В ВИДЕ ПОЛОСЫ

**А.А. Заболотных^{1,2}, В.А. Волков^{1,2}*

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 125009,
г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7, e-mail: ire@cplire.ru

²Московский физико-технический институт, Россия, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский пер., д. 9, e-mail: info@mipt.ru

PLASMONS IN 2D ELECTRON SYSTEM WITH GATE IN THE FORM OF STRIPE

**A.A. Zabolotnykh^{1,2}, V.A. Volkov^{1,2}*

¹Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Russia, 125009, Moscow,
Mokhovaya 11-7, e-mail: ire@cplire.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, 141700, Moscow Region, Dolgoprudny,
Institutskii per. 9, e-mail: info@mipt.ru

2D plasmons are well-known in two basic configurations: two-dimensional electron system (2DES) placed in dielectric medium and 2DES near which is situated infinite metallic gate. Plasmons in these systems are often referred to as ungated and gated. Many efforts were spent on investigation of plasmons in more realistic systems, namely in partly gated 2DES. We present an analytic theory which describes plasmons in 2DES with gate formed by metallic stripe over 2D plane. Our theory predicts a series of 1D gapped modes with a linear dispersion. These modes are confined under the gate and propagate along it. Surprisingly, the fundamental plasmon mode is of substantial difference from the higher ones and have gapless square root dispersion.

Плазменные колебания (плазмоны) в двумерной электронной системе (2D ЭС) хорошо известны: если 2D ЭС помещена в диэлектрик с проницаемостью κ , то плазмоны имеют корневой спектр $\omega_p(q) = (2\pi n e^2 q / \kappa m)^{1/2}$, где n – 2D концентрация электронов, e , m – их заряд и эффективная масса, q – модуль 2D волнового вектора [1]. Если параллельно 2D ЭС расположен бесконечный металлический затвор, то спектр плазмонов смягчается на множитель $(2dq)^{1/2}$, где d – расстояние между 2D ЭС и затвором. В итоге экранированные затвором плазмоны имеют линейный спектр [2] $\omega_G(q) = qV_G$, где $V_G = (4\pi n e^2 d / \kappa m)^{1/2}$ – скорость экранированных плазмонов. Отметим бесщелевой характер этих коллективных возбуждений и возможность легко перестраивать их частоту, изменяя концентрацию при приложении затворного напряжения.

Поиск спектра плазменных колебаний в системах, в которых 2D ЭС и/или металлический затвор являются ограниченными, является сложной

задачей, сводящейся к решению системы интегро-дифференциальных уравнений для амплитуды потенциала плазмона, либо плотности заряда или тока. Обычно такие задачи решаются численно.

Тем не менее, нами была аналитически (с использованием разумных приближений) решена задача о спектре плазменных колебаний в случае, когда 2D ЭС однородна и бесконечна, однако затвор конечен и имеет форму полосы [3]. Интегральное уравнение для амплитуды плазмонов решено в нижнем порядке по двум малым параметрам, основным из которых является малость частоты искомого возбуждения по сравнению с частотой неэкранированного плазмона в неограниченной системе. Оказалось, что в этом случае, несмотря на то, что 2D ЭС однородна, само наличие затвора (при нулевом напряжении на нем) приводит к появлению серии новых плазменных мод, которые локализованы вблизи и под затвором и бегут вдоль него. Основная мода имеет необычный спектр, сочетающий в себе свойства экранированных и неэкранированных плазмонов; а именно, в длинноволновом пределе частота основной моды ω пропорциональна $q^{1/2}$, как у неэкранированного плазмона, и в то же время $\omega \propto d^{1/2}$, как у экранированного (здесь волновой вектор q направлен вдоль полосы). Также найдены распределения полей и зарядов в этих модах.

Исследование выполнено в рамках гос. задания и при поддержке РФФИ (проект №17-02-01226).

Литература

1. F. Stern, Phys. Rev. Lett., **18**, 546 (1967).
2. A.V. Chaplik, Sov. Phys. JETP, **35**, 395 (1972).
3. A.A. Zabolotnykh, V.A. Volkov (<https://arxiv.org/pdf/1812.10693>).

**ПЕРЕНОС КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ
В ЭФФЕКТАХ ТУННЕЛИРОВАНИЯ**

****Н.А. Торхов^{1,2,3}***

- 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
³Томский университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Россия, 634050, г. Томск, Ленина 40

**TRANSFER OF THE SYSTEM QUANTUM-MECHANICAL STATE
IN TUNNEL EFFECTS**

****N.A. Torkhov^{1,2,3}***

- ¹Scientific- Research Institute of Semiconductors
Krasnoarmeiskaya Str., 99A, Tomsk, 634034, Russia, tel.: 83822-288122, e-mail: trkf@mail.ru
²Tomsk State University, 36, Lenina Av., Tomsk, Russia, 634050
³Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
Lenina st. 40, 634050, Tomsk, Russia

A new vision of physical nature of quantum-mechanical tunnel effect is proposed, that gives the possibility to overcome contradictions associated with the wave-corpucle duality of quantum particles.

С использованием экспериментальных методов атомно-силовой микроскопии (АСМ) по формированию областей локального электрического заряда (ЛЭЗ) на проводящих (n-Si(111)) и непроводящих (SiO₂) поверхностях через туннельно-прозрачный зазор показано, что для реализации эффекта туннелирования электронов необходимо наличие второй тождественной частицы (электрона), локализованной по другую сторону от туннельно-прозрачного потенциального барьера δ (рис. 1,*a*). При этом через потенциальный барьер проникает (туннелирует) только описываемое волновой функцией Ψ_e квантово-механическое состояние частицы (электрона), а не её корпускулярные свойства. Поэтому локальный электрический заряд удастся сформировать только в тех случаях, когда на поверхности имеются свободные электроны способные вступить в зацепленные состояния с электронами металлического зонда АСМ. Зацепленное состояние между электроном зонда и электроном поверхности возникает при обмене проникающими сквозь потенциальный барьер δ их квантовыми состояниями.

Отсутствие свободных электронов на диэлектрической поверхности (например, SiO₂) не позволяет сформировать область ЛЭЗ через образованный зазором барьер δ (рис. 1,*b*). При отсутствии второй тождествен-

ной частицы с противоположной стороны барьера δ возможно только туннелирование квантово-механического состояния первой частицы Ψ_e , но прохождение туннельного тока и формирование областей ЛЭЗ невозможно.

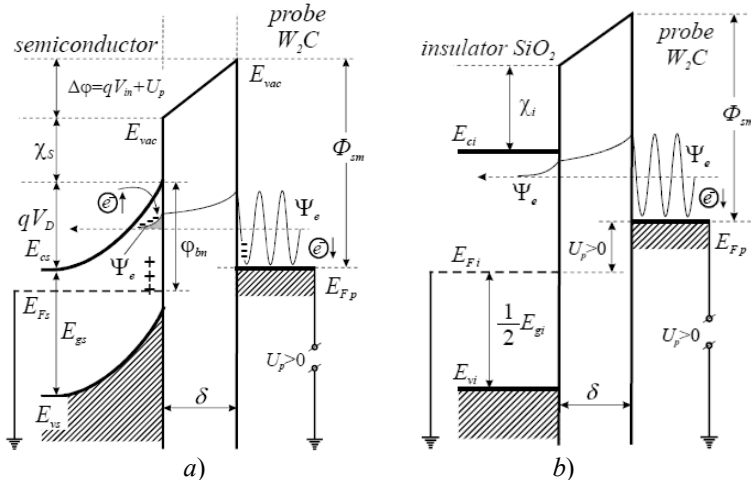


Рис. 1. Энергетическая диаграмма зонд-поверхность в методе АСМ по формированию через туннельный δ зазор областей ЛЭЗ на проводящей (n-Si(111)): – а) и на непроводящей (SiO_2), – б) поверхностях

Рассматриваемый в работе новый взгляд на известный эффект квантовомеханического туннелирования с точки зрения фундаментальных понятий (корпускулярно-волнового дуализма) необходим для построения адекватных физических моделей квантовых наносистем, позволяющих по-новому описать необычные и парадоксальные эффекты в квантовых наносистемах и одиночных элементарных частицах, которые могут быть использованы для повышения стабильности физических состояний кубитов квантовых компьютеров, чувствительности квантовых сенсоров, улучшения их управляемости, более эффективной организации в таких системах межэлементных связей, повышения защищённости линий передач, процессов переноса квантовых состояний не только между одинаковыми квантовыми объектами, но и между объектами различной физической природы (например, квантовой частицей и линиями передач), а также для совершенствования дискретных квантовых приборов, разработки и создания на основе полупроводниковых нанотехнологий высокопроизводительных квантовых нано-компьютеров.

**РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
ПЛОСКИХ p^+-n – КРЕМНИЕВЫХ ПЕРЕХОДАХ**

****Н.А. Торхов¹, А.В. Макаров¹, 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

**SIZE EFFECT IN ELECTROSTATIC SYSTEM
OF PLANAR SILICON p^+-n – JUNCTIONS**

****N.A. Torkhov¹, A.V. Makarov¹, V.A. Novikov²***

¹Scientific- Research Institute of Semiconductors
Krasnoarmeiskaya Str., 99A, Tomsk, 634034, Russia, tel.: 83822-288122, e-mail: trkf@mail.ru

²Tomsk State University, 36, Lenina Av., Tomsk, Russia, 634050

According to the measurements conducted by the Kelvin method with the use of AFM, the direct dependence of electrostatic potential of p^+ -contact surface on its diameter is determined by the direct dependence of periphery electrical field modulus E^+ on p^+ -contact area.

Различия в значениях поверхностных электростатических потенциалов (работы выхода электронов $e\phi$) полупроводников n - и p^+ - типов проводимости дает основание полагать, что вокруг периферии плоских p^+-n – переходов должны существовать электростатические поля, приводящие к эффектам, проявляющимся в зависимости электростатического потенциала поверхности выпрямляющего контакта от его линейных размеров [1, 2].

Отличие электростатической системы p^+-n –перехода от барьера Шоттки (рис. 1 *a*) проявляется, прежде всего, в превышении электростатического потенциала поверхности p^+-Si контакта над электростатическим потенциалом окружающей его $n-Si(111)$ поверхности (рис. 1 *b*). Напомним, что электростатический потенциал контактов металл-полупроводник (МП) с барьером Шоттки (БШ) меньше потенциала окружающей его полупроводниковой поверхности. Другой отличительной особенностью является то, что увеличение диаметра плоского p^+-n -перехода приводит не к уменьшению, как в случае с контактами Шоттки (рис. 2 *a*), а, наоборот, к увеличению потенциала поверхности p^+ -контакта (рис. 2 *b*).

Наблюдаемые отличия можно объяснить на основе физической модели электростатических полей периферии плоских контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки [2]. Согласно этой модели, прямая

зависимость модуля электрического поля периферии E^* от площади p^+ -контакта является причиной увеличения электростатического потенциала поверхности p^+ -контакта при увеличении его диаметра.

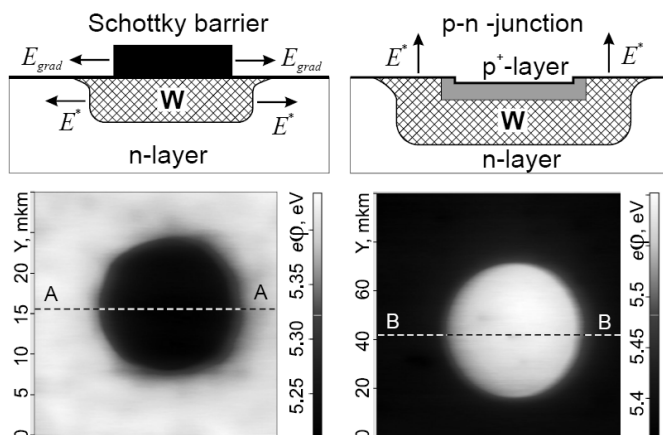


Рис. 1. Поверхностный потенциал типичного контакта М-П с БШ (конструктивная схема «Schot. barrier») – а) и p^+ - n -перехода (конструктивная схема « p^+ - n -junction») – б)

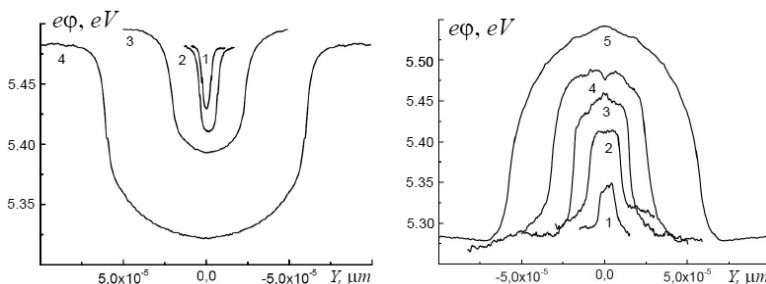


Рис. 2. Профили сечений поверхностных потенциалов ϕ : а) – контактов М-П с БШ (А-А) диаметрами D : 1 – 5 мкм, 2 – 40 мкм, 3 – 40 мкм и 4 – 100 мкм и б) – p^+ - n -переходов (сечение В-В) диаметрами D : 1 – 5 мкм, 2 – 15 мкм, 3 – 30 мкм, 4 – 50 мкм и 5 – 100 мкм

Литература

1. Н.А. Торхов, В.А. Новиков, ФТП, **45**(1), 70-86 (2011).
2. Н.А. Торхов, ФТП, **52**(10), 1150-1171 (2018).

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

^{}Я.В. Иванова¹, В.И. Зубков¹*

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина),
ул. Профессора Попова, д. 5, 197376, г. Санкт-Петербург,
e-mail: ivanova@unix-server.su

NUMERICAL CALCULATION OF RESONANT-TUNNELING STRUCTURE PARAMETERS

^{}I.V. Ivanova¹, V.I. Zubkov¹*

¹Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”
Prof. Popova St., 5, Saint-Petersburg, тел. +7(981)8450852, e-mail: ivanova@unix-server.su

This paper presents the results of modeling the GaAs/AlAs resonance-tunnel structure (RTS) for self-consistent two-barrier potential obtained by numerical solution of Schrödinger and Poisson equations. The quantum-mechanical calculation was carried out in a quantum box. Tunnel transparency of the structure is determined by the method of numerical solution of the internal task. A significant difference in determining the position of the levels for rectangular barrier approximation and for the real self-consistent potential was revealed. The influence of the quantum well in the region between the barriers on the energy position of transparency peaks is studied. For device applications the influence of the Delta-doping layer position on the transparency of the RTS was also studied.

Объектом исследований в настоящей работе являются полупроводниковые резонансно-туннельные структуры (РТС). Задачей являлся расчет РТС, учитывающий реальное распределение носителей по глубине структуры. Проводилось моделирование РТС GaAs/AlAs, конфигурация образца описана в [1]. Положение дна зоны проводимости рассчитывалось путём численного самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона [2] в квантовом ящике. Высота барьерных областей 200 мэВ. Туннельная прозрачность рассчитывалась методом [3]. Показано, что расчёт для потенциала в прямоугольном приближении дает расхождение в положении резонансных пиков: 136 мэВ и 192 мэВ, а в самосогласованном: 141 мэВ и 198 мэВ. Это может приводить к погрешности в расчете туннельного тока. Расчет для разных значений глубины ямы между барьерами представлен на рис. 1а.

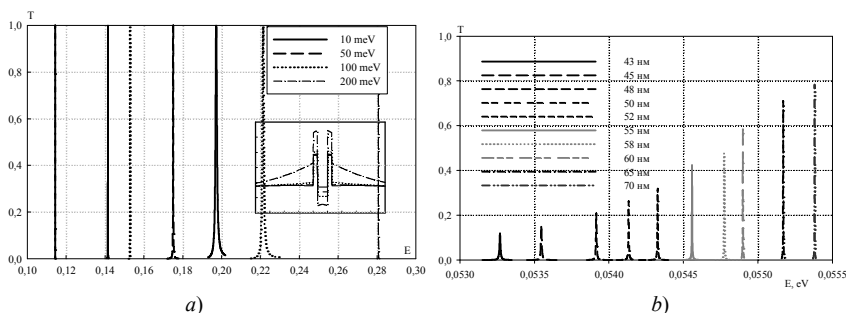


Рис.1. Расчет туннельной прозрачности РТС (а); самосогласованный потенциал для разных значений глубины ямы между барьерами (б) коэффициент пропускания РТС

При глубине ямы до 100 мэВ уровни монотонно заглубляются по энергии, являясь при этом эквидистантными. Далее, в яме формируется связанное состояние, что приводит к сильному сдвигу уровней резонансного пропускания в сторону больших энергий. Существенное влияние на положение и величину резонансно-туннельного пропускания оказывает, как известно, симметрия барьеров. В современных приборах, использующих подобного рода структуры, все чаще применяют дельта-легирование. (НЕМТ-структуры) [4]. Была рассчитана структура, содержащая дельта-легированный слой и КЯ (рис.1б). Видно, что он вносит значительную асимметрию в структуру, что влечет за собой большое снижение резонансно-туннельной прозрачности. При этом увеличение расстояния между ямой и дельта-слоем будет уменьшать вероятность эффективной поставки носителей в КЯ. Таким образом, необходимо выбрать некий оптимум.

Таким образом, впервые выполнен точный (самосогласованный) расчет положения уровней прозрачности в РТД с учетом реального распределения потенциала по структуре, что является необходимым при исследовании и разработке приборов на резонансном туннелировании.

Литература

1. M.O. Makeev et al., *Obrazovanie i nauka*, **11**, 229 (2013).
2. V.I. Zubkov, *Semocond.*, **41**(3), 331 (2007).
3. I.V. Ivanova, V.I. Zubkov, *Izvestiya LETI*, **9**, 9 (2018).
4. I.V. Ivanova et al., *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, **5**, 44 (2018).

**ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ НА ДВУМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ
НА ГЕТЕРОГРАНИЦЕ n-GaAs/AlGaAs:Si**

****Е.В. Богданов¹, Н.Я. Минина¹***

¹Московский 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 TWO DIMENSIONAL ELECTRONS
AT n-GaAs/AlGaAs:Si HETEROINTERFACE**

****E.V. Bogdanov¹, N.Ya. Minina¹***

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

The galvanomagnetic effects in weak magnetic fields and the Shubnikov-de Haas oscillations in a quantizing magnetic field were investigated in (001) n-GaAs/Al_xGa_{1-x}As:Si heterostructures ($x = 0.2; 0.3$) at 4.2 K under uniaxial compression up to $P = 3.5$ kbar in the [110] and [1-10] directions. It has been established that uniaxial compression influence on the transport properties of two-dimensional electrons at the (001) n-GaAs/Al_xGa_{1-x}As:Si heterointerface are determined by the emerging piezoelectric field and the charge redistribution caused by this field while the parabolicity and anisotropy of the energy spectrum of two-dimensional electrons do not change appreciably.

Гальваномагнитные эффекты в слабом магнитном поле и осцилляции Шубникова – де-Гааза в квантующих магнитных полях ($H \leq 6$ Т) были исследованы в (100) n-GaAs/Al_xGa_{1-x}As:Si гетероструктурах при 4.2 К в условиях одноосного сжатия в направлениях [110] и [1-10] до нагрузок $P = 3.5$ кБар. Установлено, что изменение транспортных свойств двумерных электронов на гетерогранице n-GaAs/Al_xGa_{1-x}As:Si при сжатии обусловлено главным образом появляющимся пьезоэлектрическим полем. Это поле, которое направлено от подложки к гетерогранице при $P \parallel [1-10]$ и в противоположном направлении при $P \parallel [110]$, достигает при $P = 1$ кБар величины $|E| = 1.15 \cdot 10^4$ В/см, что сравнимо с исходным встроенным полем $\sim 10^5$ В/см на гетерогранице [1].

Образцы GaAs/Al_xGa_{1-x}As:Si с содержанием алюминия $x = 0.3$ и 0.21 выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на GaAs подложке в направлении [001] и характеризуются при 4.2 К концентрациями электронов в квантовой яме $n \approx 3.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $2.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и подвижностями вдоль [011] $\mu \approx 70 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $35 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, соответственно. Значения концентрации электронов, полученные из частот осцилляций Шубникова – де Гааза, оказались с точностью 2-3% равны концентрации, полученной на

основании исследований эффекта Холла, что указывает на отсутствие параллельной проводимости. При освещении красным светодиодом в жидком гелии образцы переходили в состояние положительной задержанной фотопроводимости.

Установлено, что в условиях экранирования от внешнего излучения пьезополе (вместе с компенсирующим его перераспределением пространственного заряда на гетерогранице) увеличивает концентрацию электронов в квантовой яме при $P \parallel [110]$ и уменьшает ее при $P \parallel [1-10]$.

После освещения красным светодиодом, что приводит к задержанной фотопроводимости, зависимость концентрации двумерных электронов от нагрузки демонстрирует при $P \parallel [1-10]$ гистерезис, который также может быть связан с вызванным пьезополем перераспределением заряда в буферном и активном слоях гетероструктуры. При сжатии вдоль направления $[110]$ этот эффект отсутствует.

В отличие от двумерных дырок в (100) $p\text{-GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}:\text{Be}$, которые проявляли заметную барическую зависимость эффективной массы [2], полученные из температурной зависимости амплитуды осцилляций Шубникова – де Гааза эффективные массы двумерных электронов в исследованных образцах (100) $n\text{-GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}:\text{Si}$ не изменяются при сжатии до 2.5 кБар в пределах ошибки измерений $\pm 3\%$.

В отсутствии деформации подвижность двумерных электронов в направлении $[110]$ несколько ниже, чем в направлении $[1-10]$, что связано с особенностями рассеяния на шероховатостях гетерограницы [3]. При сжатии анизотропия подвижности несколько меняется (так, при $P \parallel [110]$ анизотропия возрастает примерно на 15% под нагрузкой $P = 2.5$ кбар), что может быть полностью объяснено изменением концентрации двумерных электронов и её влиянием на вероятность рассеяния, а не трансформацией энергетического спектра, как это имеет место с двумерными дырками в (100) $p\text{-GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}:\text{Be}$, у которых при таких же деформациях отмечается рост анизотропии подвижности в 2 раза [4].

Литература

1. В.Н. Кравченко, Н.Я. Минина, А.М. Савин, ЖЭТФ, **118**, 1443 (2000).
2. O.P. Hansen, W. Kraak, N.Ya. Minina, J.S. Olsen, A.B. Saffian, A.M. Savin, Phys. Low-Dimensional Structures, **12**, 187 (1995).
3. B. Yang, Y.-H. Cheng, Z.-G. Wang, J.-B. Liang, Q.W. Liao, Z.-P. Zhu, B. Xu, W. Li, Appl. Phys. Letters, **65**, 3329 (1994).
4. N.Ya. Minina, K.I. Kolokolov, S.D. Beneslavski, E.V. Bogdanov, A.V. Polyanskiy, A.M. Savin, O.P. Hansen, Physica E, **22**, 373 (2004).

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ В ПЛЕНКАХ АЛМАЗА

**А.А. Васильченко¹*

¹Кубанский государственный университет,
Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, дом 149, e-mail: a_vas2002@mail.ru

HIGH-TEMPERATURE ELECTRON-HOLE LIQUID IN DIAMOND FILMS

**А.А. Vasilchenko¹*

¹Kuban State University,
Russia, 350040, Krasnodar, Stavropolskaya, 149, e-mail: a_vas2002@mail.ru

The ground state of the electron-hole liquid in diamond films is studied by density functional theory. The energy and equilibrium density of the liquid in films with thicknesses of a few nanometers are calculated. It is shown that the electron-hole liquid is multicomponent and consists of electrons and heavy, light, and spin-orbit split holes. The critical temperature of the electron-hole liquid in (111)-oriented diamond films is close to room temperature.

В работе [1] аналитически вычислены энергия и равновесная плотность электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) в пленках алмаза с толщиной в несколько нанометров. Показано, что ЭДЖ является многокомпонентной и состоит из электронов, тяжелых, легких и спин-орбитально расщепленных дырок.

В настоящей работе используется теория функционала плотности для самосогласованных вычислений энергии ЭДЖ. Используется модель, предложенная в работе [2]. Считаем, что алмазная пленка помещена между двумя широкозонными диэлектриками, которые создают для электронов и дырок квантовые ямы шириной d глубиной U . Численно решаются уравнения Шредингера для электронов, тяжелых, легких и спин-орбитально расщепленных дырок.

Вычисления показали, что ЭДЖ в пленках алмаза является четырехкомпонентной, например, при $d = 1$ и $U = 20$ плотности тяжелых дырок $N_{hh} \approx 0,73$, легких дырок $N_{hl} \approx 0,27$ и спин-орбитально расщепленных дырок $N_{so} \approx 0,12$ (все величины приведены в экситонной системе единиц). На рис. 1. приведена зависимость энергии на одну электронно-дырочную пару от глубины потенциальных ям для различных ширин квантовых ям. Величина энергии основного состояния может достигать значения $E_{gs} = -2,4$ (–220 мэВ), что значительно меньше величины энергии трехмерной ЭДЖ, –130 мэВ. В объемных полупроводниках критическую темпе-

ратуру ЭДЖ можно оценить, как $T_c = 0,1|E_{gs}|/k_B$ [3]. Используя это выражение для пленок алмаза, получаем $T_c = 260$ К.

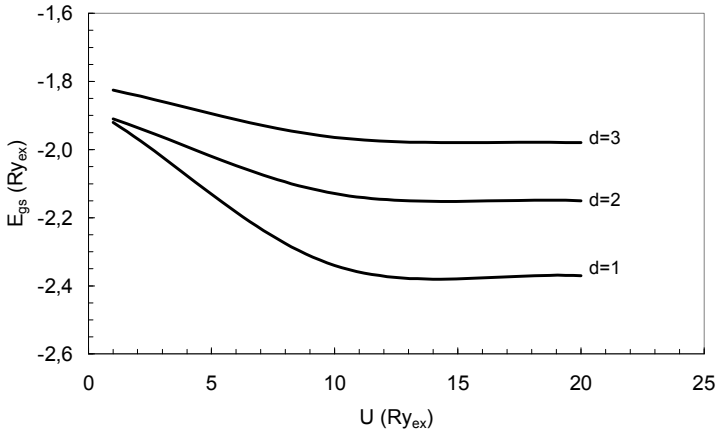


Рис. 1. Зависимость энергии на одну электронно-дырочную пару от глубины потенциальных ям для (111) пленки алмаза

Критическую температуру ЭДЖ также можно оценить по плотности электронно-дырочных пар [4]. Для алмазной пленки с толщиной $d = 1$ и $U = 20$ вычисленная трехмерная плотность электронно-дырочных пар $n \approx N/d = 1,1$ ($4,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Эта величина плотности более чем в четыре раза превосходит плотность трехмерной ЭДЖ, поэтому следуя работе [4] получим для ЭДЖ в пленке алмаза критическую температуру $T_c = 270$ К. Оценка критической температуры проведена для трехмерной модели. Для квазидвумерной ЭДЖ критическая температура может быть выше, чем для трехмерной ЭДЖ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-42-700012).

Литература

1. А.А. Васильченко, Г.Ф. Копытов, Известия высших учебных заведений. Физика, **61**, 727 (2018).
2. А.А. Васильченко, Письма в ЖЭТФ, **108**, 185 (2018).
3. R. Shimano et al., Phys. Rev. Lett., **88**, 057404 (2002).
4. F. E. Leys et al., Phys. Rev. B, **66**, 073314 (2002).

**ВОЗБУЖДЕНИЕ МАГНИТОПЛАЗМОНОВ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ДВУМЕРНОМ
ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

^{}И.В. Загороднев^{1,2}, Д.А. Родионов^{1,2}*

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 125009,
г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7, e-mail: ire@cplire.ru

²Московский физико-технический институт, Россия, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский пер., д. 9, e-mail: info@mipt.ru

**EXCITATION OF MAGNETOPLASMONS IN INFINITE TWO-DIMENSIONAL
ELECTRON GAS BY ELECTROMAGNETIC RADIATION**

^{}I.V. Zagorodnev^{1,2}, D.A. Rodionov^{1,2}*

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Russia, 125009, Moscow,
Mokhovaya 11-7, e-mail: ire@cplire.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, 141700, Moscow Region, Dolgoprudny,
Institutskii per. 9, e-mail: info@mipt.ru

The coefficient of absorption was analyzed for electromagnetic waves in two-dimensional electron gas in constant magnetic perpendicular field with conductivity from Drude's model. The connection between the maximum in dependent the coefficient of absorption on incident angle and eigenmodes of magnetoplasmon oscillations was found.

В работе [1] проанализирован закон дисперсии плазмонполяритонов в постоянном магнитном поле, ортогональном плоскости 2D электронной системы (2D EG). Оказалось, что он существенно зависит от параметров системы, а при определенных параметрах системы (в фазах S1 и S2) возникает новая высокодобротная мода, расположенная выше световой ветви. Однако вопрос о том, как эта мода может быть возбуждена осталась открытым. В данном докладе мы ответим на этот вопрос [2].

Для этого мы вычислили оптические коэффициенты (поглощения, прохождения и отражения) при прохождении плоской электромагнитной волны через латерально неограниченную 2D электронную систему, которая описывается формулой друде с учетом диссипации и перпендикулярного магнитного поля, и установили, что полюса оптических коэффициентов вообще не связаны с магнитоплазмонами. Парадокс состоит в том, что при этом в зависимости коэффициента поглощения от угла падения может быть максимум, который связан с увеличением поглощения за счет возбуждения магнитоплазмонов. Причем предсказанные в работе [1] новые высокодобротные магнитоплазмоны, идущие выше дисперсии света, проявляются в коэффициенте поглощения плоской ЭМ волны даже в системе с низкой проводимостью, когда $2\pi\sigma_0/c < 1$ (т.е. в фазах S1 и S2 ра-

боты [1]), где σ_0 – статическая друдевская проводимость, а c – скорость света. При этом все оптические коэффициенты (отражения, прохождения и поглощения) вне циклотронного резонанса монотонно зависят от частоты. Коэффициенты прохождения и отражения, к тому же, монотонно зависят от угла падения. И лишь коэффициент поглощения для s -поляризации имеет максимум в зависимости от угла падения ЭМ волны, возникающий из-за возбуждения магнитоплазмонов.

Литература

1. V.A. Volkov et al., Phys. Rev. B, **94**, 165408 (2016).
2. Д.А. Родионов и И.В. Загороднев, Письма в ЖЭТФ, **109**, 124 (2019).

**КВАНТОВЫЕ ПОПРАВКИ И МАГНИТОТРАНСПОРТ
В 3D ДИРАКОВСКОМ ПОЛУМЕТАЛЛЕ $\text{Cd}_{3-x}\text{Mn}_x\text{As}_2$**

**А.Б. Мехия¹, А.А. Казаков¹, А.Б. Аронзон¹, Л.Н. Овешников¹, А.Б. Давыдов¹, А.И. Риль²,
С.Ф. Маренкин²*

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Россия, 119333, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, e-mail: website@lebedev.ru

²Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН

Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, e-mail: info@igic.ras.ru

**QUANTUM CORRECTIONS AND MAGNETOTRANSPORT
IN 3D DIRAC SEMIMETAL $\text{Cd}_{3-x}\text{Mn}_x\text{As}_2$**

**A.B. Mejia¹, A.A. Kazakov¹, A.B. Aronzon¹, L.N. Oveshnikov¹, A.B. Davydov¹, A.I. Ril²,
S.F. Marenkin²*

¹Lebedev Physical Institute of the RAS

Russia, 119333 Moscow, Leninsky prospect 53, e-mail: website@lebedev.ru

²Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS

Russia, 119071 Moscow, Leninsky prospect 31, e-mail: info@igic.ras.ru

In this study we investigate magnetotransport of three-dimensional Dirac semimetal (3D DS) Cd_3As_2 with addition Mn in content $x = 0, 5, 10\%$ ($\text{Cd}_{3-x}\text{Mn}_x\text{As}_2$). Films were prepared by vacuum evaporation deposition on Sitall substrate. Magnetotransport measurements, temperature dependence resistivity in range from 300 K to 4.2 K, and Hall effect were carried out. Absence of weak antilocalization observed in sample with $x = 10\%$ makes possible to suppose of transition band structure from DS to semiconductor.

В данной работе изучаются пленки твердых растворов на основе дираковского полуметалла (ДП) Cd_3As_2 с добавлением марганца. За счет наличия магнитной компоненты пленки $\text{Cd}_{3-x}\text{Mn}_x\text{As}_2$ представляют интерес для спинтронных приложений. В чистом Cd_3As_2 возможно наблюдение таких необычных эффектов как квантовый эффект Холла, гигантский диамагнетизм и пр. В энергетическом спектре данного материала присутствуют дираковский конус, который обладает линейным законом дисперсии. При добавлении магнитной примеси возможно открытие обменной щели в дираковских точках, что даёт возможность управлять шириной запрещённой зоны в топологических системах.

Данный материал является трехмерным кристаллом и по своим свойствам сравним с графеном, поскольку электроны в нем ведут себя как безмассовые частицы. Исследуемые пленки были синтезированы методом вакуумно-термического напыления на подложках из ситалла. Были произведены магнитотранспортные исследования, рассчитаны холлов-

ские и транспортные параметры. Основным результатом эксперимента является наблюдение квантовых поправок к проводимости.

При измерении температурной зависимости в диапазоне от 300 К до 4 К было обнаружено, что на протяжении всего диапазона, характер температурной зависимости остаётся полупроводниковым (рис. 1). Для определения параметров образцов снималась зависимость продольного и холловского сопротивления в малых полях (до 2Т), перпендикулярных плоскости образца. На рисунке представлена зависимость изменения проводимости от внешнего магнитного поля. При прохождении замкнутого контура квантовомеханическая система испытывает адиабатическое возмущение и появляется набег фазы, называемой фазой Берри. В топологических полуметаллах поверхностные состояния в дираковском конусе имеют нетривиальную фазу Берри π , в тривиальном состоянии фаза Берри равна нулю. Это превращает конструктивную интерференцию в деструктивную, и слабая локализация отсутствует.

Это позволяет предположить, что образец $\text{Cd}_{2.9}\text{Mn}_{0.1}\text{As}_2$ (рис. 2) не является дираковским полуметаллом, так как в нём наблюдается выраженная слабая локализация.

Наличие антилокализации свидетельствует о присутствии фазы топологического полуметалла. С увеличением доли Mn, антилокализационная поправка исчезает, и наблюдается слабая локализация. Нетривиальная фаза Берри разрушает слабую локализацию в ДП, что позволяет предположить о наличии перехода от ДП к полупроводнику, при достижении концентрации Mn порядка 7–8 %.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 17-12-01345.

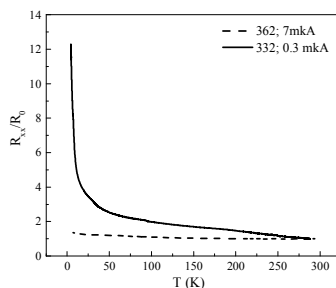


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления при охлаждении для $\text{Cd}_{2.9}\text{Mn}_{0.1}\text{As}_2$ (сплошная линия) и Cd_3As_2 (прерывистая линия)

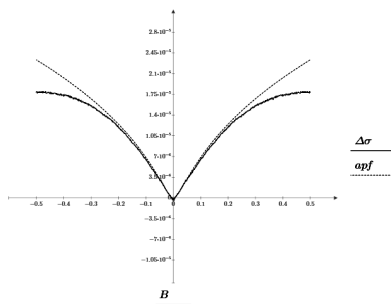


Рис. 2. График магнетопроводимости, видно явление слабой локализации $\text{Cd}_{2.9}\text{Mn}_{0.1}\text{As}_2$

**ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ FOUNDRY
ПРОИЗВОДСТВА СВЧ ЭКБ: ОПЫТ АО "СВЕТЛАНА-РОСТ"**

^{}Д.М. Красовицкий¹, А.Г. Филаретов¹, В.П. Чалый¹*

¹АО «Светлана-Рост». пр. Энгельса, 27, 194156, Санкт-Петербург,
тел.: +7(812) 313-54-51, e-mail: d.krasovitskij@svrost.ru

**PHYSICS AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MICROWAVE FOUNDRY
DEVELOPMENT: "SVETLANA-ROST" EXPERIENCE**

^{}Д.М. Krasovitsky¹, А.Г. Filaretov¹, V.P. Chaly¹*

¹Svetlana-Rost, JSC. Engels ave., 27, 194156, Saint Petersburg,
phone: +7(812) 313-54-51, e-mail: d.krasovitskij@svrost.ru

The paper reports main physical principles of development and usage of Process Design Kits (PDK) for the manufacture of monolithic microwave integral circuits MMIC (MMIC) based on semiconductor heterostructures. It is shown that the «golden die», determined as a physical cell having all the parameters confined in the range predicted by the technology variability, essentially improves the model convergence to experimental data and thus reliability of MMIC design. Current company achievements and challenges are also observed.

Ведущие мировые научно-производственные центры полупроводниковой микроэлектроники уже десятки лет широко применяют принципы «foundry», основанные на разделении ответственности между конструкторским и технологическим «крыльями» разработки, взаимоувязанными, в то же время, четко сформулированными правилами взаимодействия, так называемым комплексным инструментом проектирования (Process Design Kit- PDK) [1]. Эти правила учитывают, с одной стороны, топологические ограничения и естественную изменчивость технологического процесса, а с другой – содержат в себе всеобъемлющую информацию о параметрах стандартных элементов – физических объектов, создаваемых в данном технологическом процессе. Эта комплексная информация используется для проектирования в САПР целых классов конструктивно и технологически подобных устройств, которые затем изготавливаются по единому, неизменному технологическому процессу.

Библиотека стандартных элементов, лежащая в основе всех проектируемых устройств, является важнейшим компонентом PDK еще по одной причине. Принцип наследования характерных свойств элементарной модели на разных уровнях системной архитектуры (так называемое «сквоз-

ное» проектирование) делает возможным достоверное предсказание различных параметров устройств верхнего уровня на основе известных параметров стандартных элементов. В частности, это позволяет построить методики оценки характеристик надёжности устройств, их устойчивости к воздействию различных факторов (иными словами – поведенческую модель, наличие которой присутствует теперь в большинстве технических заданий на разработку изделий ЭКБ). Таким образом, библиотека стандартных элементов в составе стандартной технологии может являться объектом, позволяющим, после проведения ее испытаний по соответствующим методикам, распространить результаты этих испытаний на весь класс разрабатываемых устройств.

Для успешного проектирования радиоэлектронной аппаратуры вопрос достоверности поведенческих моделей применяемых изделий ЭКБ является одним из важнейших. Однако в случае привлечения верифицированного комплексного инструмента проектирования (PDK) вопрос достоверности решается естественным образом. Это становится возможным благодаря наличию объективных свидетельств целостности типового технологического процесса изготовления изделий ЭКБ (путем его мониторинга в контрольных точках) и его стабильности во времени (воспроизводимости) путем построения карт Шухарта [2]. И наличие такой возможности имеет фундаментальную физическую подоплеку.

Учитывая статистический характер изменения основных свойств полупроводниковых материалов, успех сквозного проектирования напрямую зависит от корректной оценки диапазонов этих изменений и их учета в матрице параметров модели каждого из стандартных элементов, составляющих библиотеку. В свою очередь, необходимым условием воспроизводимости технологических процессов является строгое выполнение совокупности требований к параметрам межоперационного контроля и неразрывное соответствие этих параметров набору функциональных выходных характеристик стандартных элементов. Таким образом, для построения статистически достоверного PDK необходимо связать в реляционной базе данных две статистических совокупности: распределение множества параметров различной размерности, характеризующее естественную изменчивость технологического процесса, и распределение статистических состояний ячеек, содержащих элементы библиотеки.

Инструмент проектирования оперирует с параметрами физических объектов, создаваемых по планарной технологии. Эти параметры можно измерить и, таким образом, дать численную оценку самой технологии. Объектом для оценки является специально разработанный для процесса параметрический монитор (ПМ), включающий в себя набор тестовых

элементов, являющийся отображением создаваемых на разных стадиях технологического процесса физических объектов. Распределение ПМ по площади полупроводниковой пластины позволяет определить изменчивость технологического процесса и по площади пластины, и (в сходственных точках) от пластины к пластине. Специальное программное обеспечение позволяет осуществлять сбор и обработку информации в статистически значимых количествах, выстраивать корреляции между параметрами и их группами, осуществлять мониторинг изменения параметров во времени. Таким образом, массив характеристик ПМ можно назвать проекцией технологического процесса. Если рассматривать всю технологию как множество генеральных совокупностей, каждая из которых соответствует конкретному электрическому параметру, то изготовление пластин в рамках данной технологии можно отождествить с взятием выборки из соответствующих генеральных совокупностей.

Процедура характеристики технологического процесса включает в себя не только определение среднего значения и стандартного отклонения каждого параметра, но и границ, в которых данные статистики могут изменяться без нарушения целостности модели, описывающей выходные параметры. В итоге появляется массив данных, характеризующих через свойства физических объектов (тестовых элементов) «статистические состояния» технологического процесса.

Следующей стадией разработки, ради которой «все и затевалось», является проектирование СВЧ МИС на основе разработанной библиотеки (верификация PDK), которую проводят в два этапа [2]. Целью первичной верификации является проверка правильности выбора общего направления разработки, достаточности состава библиотек, качественное соответствие моделей результатам измерений физических объектов. Степень сходимости моделей уже на этом этапе бывает значительной, благодаря реализации принципа учета при моделировании естественной изменчивости технологии. Однако наибольшая достоверность может быть достигнута лишь после определения «среднестатистической ячейки» (в англоязычной литературе – «golden die» (GD)), отвечающей совокупности наиболее ожидаемых значений параметров ВСЕМ физических объектов, создаваемых в технологическом процессе.

АО «Светлана-Рост» уже более 15 лет последовательно развивает указанные выше принципы для проектирования и производства СВЧ ЭКБ с рабочими частотами до 18 ГГц. За это время созданы десятки объектов интеллектуальной собственности, оригинальная аппаратура, методики и программное обеспечение. Важнейшим организационно-финансовым следствием применения метода foundry является значительное сокраще-

ние сроков от согласования и утверждения топологических проектов до завершения изготовления пластин с кристаллами устройств. Как показал наш реальный опыт, в отдельных случаях удастся сократить цикл от начала проектирования СВЧ устройства (например, умножителя частоты) до завершения его испытаний по электрическим СВЧ параметрам на пластине до 4 месяцев. Так, в ходе эксплуатации PDK в составе стандартной технологии рНЕМТ05, за 15 месяцев были успешно реализованы более 120 проектов МИС с рабочими частотами 2-18 ГГц, в том числе ограничители мощности, переключатели, умножители, фазовращатели, аттенюаторы, малошумящие и линейные усилители и др. Найден и вариант решения вопроса включения «фабрики» в кооперацию при производстве ЭКБ с приемкой ВП, заключающийся в определении предмета кооперации как «изготовления набора элементов на поверхности и в объеме полупроводниковой пластины, соединенных между собой по конструкторской документации заказчика». В текущем году компания должна успешно завершить уже второй контракт подобного рода. В перспективном портфеле АО «Светлана-Рост» – создание PDK в составе наиболее востребованных стандартных технологий, таких, как технология на основе одновременного применения нормально-открытых и нормально-закрытых полевых транзисторов, технология гетеробиполярных транзисторов и др.

Литература

1. C. Chen, S. Kayali, E. Rezek, and T. Trinh, (JPL Publication 96-25, USA) 123–129 (1996).
2. Foundry process qualification Guidelines. JEDEC/FSA JP-001.2002 (2014).

**РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ
НА ОСНОВЕ AlGaN/GaN И InAlN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУР**

****Л.Э. Великовский¹, П.Е. Сим¹, О.И. Демченко¹, Н.Е. Курбанова¹, А.В. Сахаров^{2,4},
В.В. Лундин², Е.Е. Заварин², Д.А. Закгейм², А.Ф. Цацульников⁴, Д.С. Артеев²,
М.А. Яговкина², А.А. Аксенов³, В.В. Курикалов³***

¹Томский государственный университет

Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: velikovskiy.l@gmail.ru

²ФТИ им. Иоффе, Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

³АО «НПФ «Микран», Россия, 634041, Томск, пр. Кирова, 51д

⁴НТЦ Микроэлектроники РАН, Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AlGaN/GaN
AND InAlN/GaN-BASED RF HEMT's**

****L.E. Velikovskiy¹, P.E. Sim¹, O.I. Demchenko¹, N.Y. Kurbanova¹, A.V. Sakharov^{2,4},
W.V. Lundin², E.E. Zavarin², D.A. Zakheim², A.F. Tsatsulnikov⁴, D.S. Arteev²,
M.A. Yagovkina², A.A. Aksenov³, V.V. Kurikalov³***

¹Tomsk State University, 634050, 36 Lenin ave., Tomsk, Russia, e-mail: velikovskiy.l@gmail.ru

²Ioffe Institute, 194021, 26 Politehnicheskaya, St Petersburg, Russia

³JSC Micran, Research and Production Company, 634041, Kirov ave., Tomsk, Russia

⁴Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center RAS, 26
Politehnicheskaya, 194021, St Petersburg, Russian Federation

High electron mobility transistors (HEMTs) technologies based on AlGaN/GaN and InAlN/GaN heterostructures have been developed. The research focused on influence of epitaxial growth conditions and buffer doping profiles on electrical properties of these transistors. An output power density of 4W/mm at 17 GHz and $V_{ds}=15V$ was demonstrated for InAlN/GaN HEMTs and 7W/mm at 10 GHz and $V_{ds}=33V$ for AlGaN/GaN HEMTs.

Благодаря успешной разработке технологии СВЧ МИС на основе нитрида галлия этот материал открыл возможность для значительного улучшения основных параметров усилительных СВЧ МИС в широком диапазоне частот. Технологическая линия производства GaAs СВЧ МИС АО «НПФ «Микран» была использована для разработки и исследования AlGaN/GaN и InAlN/GaN транзисторов, предназначенных для создания мощных СВЧ МИС, планируемых для использования в составе изделий, выпускаемых компанией. В качестве подложек используется карбид кремния диаметром 100мм.

Разработаны технологии и получены образцы активных и пассивных элементов МИС для двух технологий: с $L_g = 0,5$ мкм, изготавливаемой с помощью проекционной (i-line) литографии и $L_g = 0,25$ мкм, изготавливаемых с помощью проекционной и электронно-лучевой литографий. В импульсном режиме измерений транзисторы с $L_g = 0,5$ мкм при $V_d = 50$ В имеют удельную мощность $8 \div 10$ Вт/мм на частоте 2,5 ГГц. На частоте 10 ГГц транзисторы с $L_g = 0,25$ мкм и $V_d = 33$ В показали удельную мощность около 7 Вт/мм при коэффициенте усиления $13 \div 17$ дБ и $PAE > 45\%$. Для достижения максимального напряжения пробоя в транзисторе при минимальном эффекте коллапса тока проводилась оптимизация конструкции буферного слоя и сравнение параметров транзисторов с нелегированным, легированным железом и легированным углеродом буферным слоем. Минимальный коллапс тока наблюдался при легировании железом. Измерения ВАХ проводились при длительности импульса 250 нс, для оценки сравнивались характеристики $I_d(V_d)$ для $V_g = 0$, измеренные при различных точках покоя (рис. 1).

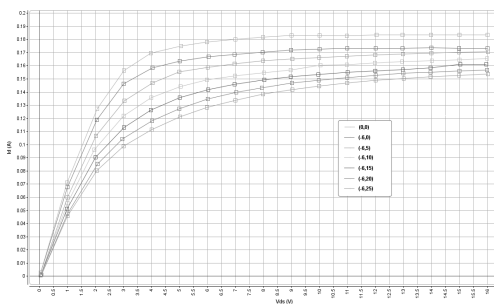


Рис. 1. Сравнение $I_d(V_d) = 0$ в AlGaIn/GaN HEMT с Fe-легированным буферным слоем при различных напряжениях в точках покоя ($V_g = 0$ В, $V_d = 0$ В), ($V_g = -6$ В, $V_d = 5 \div 25$ В).

Длина импульса 250 нс

Напряжение пробоя в буферном слое, полученное в результате оптимизации профиля легирования, составило 220–250 В.

Разработанная технология низкоомных ($R_c \leq 0,25$ Ом·мм) омических контактов позволяет за счет низкой толщины металлов (0,12 мкм), и низкой шероховатости поверхности ($RMS \approx 14$ нм) уменьшать расстояния в транзисторе, приближая затвор к истоку и снижать до $1,5 \div 2$ мкм расстояния исток-сток.

В рамках ФЦП «Исследование и разработка по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» Томским государственным университетом на технологической базе АО «НПФ «Микран» выполняется проект «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий

космического применения», предполагающий создание СВЧ транзисторов с удельной мощностью 3,5 Вт/мм в диапазоне 30–40 ГГц. За счет большего, чем в AlGaIn/GaN, разрыва зоны проводимости, InAlN/GaN гетероструктуры позволяют увеличить до 2–3 А/мм плотность тока в транзисторе. Благодаря этому можно компенсировать снижение рабочего напряжения в короткоканальных транзисторах с тонким барьерным слоем и получить в миллиметровом диапазоне длин волн высокую мощность и усиление. Разработка технологии эпитаксиального роста InAlN/GaN гетероструктур методом MOCVD проводилась в НТЦ «Микроэлектроника». InAlN является наименее изученным среди твердых растворов, что связано со сложностью его эпитаксии (условия роста Al-содержащих и In-содержащих слоев отличаются – оптимальные температуры для InN ~ 600 °C, а для AlN ~ 1200 °C). Послойный анализ состава образцов InAlN/AlN/GaN методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показал, что слой InAlN однороден по составу индия, а содержание индия соответствует заданному.

Исследование влияния мольной доли InAlN на электрофизические параметры двумерного электронного газа (рис. 2) показало, что при 13÷15 % In в InAlN слоевая проводимость имеет максимум.

Было обнаружено значительное влияние величины потока триметиллиндия при росте InAlN на явление коллапса тока стока, что можно связать с изменением спектра и концентрации глубоких центров в слое InAlN и на поверхности.

Проведенное электрофизическое моделирование InAlN/AlN/GaN транзисторов с $L_g = 0,5$ мкм в программном пакете Silvaco TCAD показало хорошее соответствие расчетных ВАХ транзисторов измеренным характеристикам (рис. 3).

При использовании тонкого (5÷7 нм) барьерного слоя InAlN в сочетании с тонкой вставкой AlN над каналом подвижность и концентрация электронов находятся в диапазоне $1000 \div 1200$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $2,5 \div 3,3$ см^{-3} , соот-

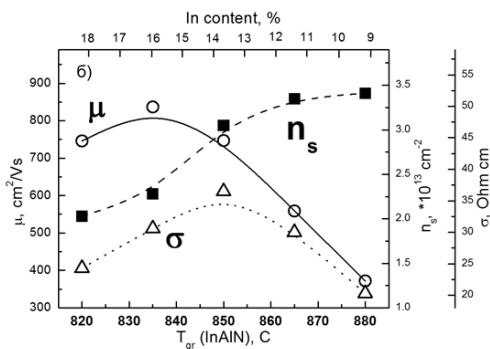


Рис. 2. Зависимости концентрации и подвижности электронов и проводимости в InAlN/AlN/GaN гетероструктурах

ответственно. Изготовленные на таких гетероструктурах НЕМТ с $L_g = 0,12$ мкм имеют ток I_{dmax} более 1,4 А/мм, $g_m \approx 600$ мСм/мм при напряжении отсечки $V_{th} = -1,5$ В.

Применение разработанных для AlGaIn/GaN вплавных омических контактов на основе Ti/Al/Mo/Au для формирования контактов к InAlN/GaN гетероструктурам выявило эффект деградации электрофизических параметров при нагреве до 825°C и выше. Проведенные на частоте 17 ГГц импульсные измерения транзисторов на пластине с СВЧ тюнерами импеданса показали удельную мощность 3.5÷4 Вт/мм, достигаемую при напряжении питания 15В, и усиление в линейном режиме 10÷12 дБ. Для изготовленных транзисторов разработаны линейные и нелинейные СВЧ модели. Улучшение параметров данной технологии предполагает изменение конструкции гетероструктуры за счет внедрения барьерного слоя под каналом, обеспечивающего уменьшение утечки транзистора в закрытом состоянии [1], и, за счет этого, повышение КПД по добавленной мощности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 14.578.21.0240 от 26.09.17, уникальный идентификатор работ (проекта) 0000000007518PQK0002.

Литература

1. Fujitsu Achieves World's Highest Output Density with Power Amplifier for W-Band GaN Transmitters, Press release, Fujitsu Laboratories Ltd. (2017), <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2017/0724-01.html> (2003).

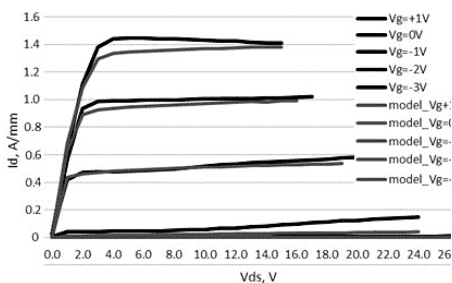


Рис. 3. Сравнение расчетных (серые кривые) и экспериментальных (черные кривые) ВАХ InAlN/AlN/GaN HEMT

**ДЕГРАДАЦИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ AlGaN/GaN HEMT,
СВЯЗАННАЯ С МОРФОЛОГИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

***К.Л. Енишерлова¹, Б.К. Медведев¹, Ю.В. Колковский¹, Э.М. Темпер¹, В.И. Корнеев¹**

¹АО «НПП «Пульсар», Москва, Окружной проезд, дом 27, e-mail: enisherlova@pulsarnpp.ru

**DEGRADATION OF THE AlGaN/GaN HEMT OHMIC CONTACTS, ASSOCIATED
WITH SURFACE MORPHOLOGY**

***K.L. Enisherlova¹, B.K. Medvedev¹, Yu.V. Kolkovsky¹, E.M. Temper¹, V.I. Korneev¹**

¹J&C «S&PE «Pulsar», Moscow, Okružhnoy proezd, 27, e-mail: enisherlova@pulsarnpp.ru

The influence of the surface morphology on ohmic contacts of Al-GaN/GaN HEMT crystals was investigated. A correlation was established between the surface microrelief and the resistance of ohmic contacts. It is shown that the presence of rod-like defects with high density leads to an increase in leakage currents of devices.

Целью данной работы было исследование особенностей структуры областей истока (И) и стока (С) нитридных НЕМТ-транзисторов, влияние их микрорельефа, плотности дислокаций и других дефектов в эпитаксиальных слоях на параметры формируемых омических контактов. Исследовались 2-е группы кристаллов мощных СВЧ - транзисторов S- и X-диапазона. Группы отличались величинами ширины и длины затвора. Все транзисторы имели планарное расположение контактных окон к областям исток, затвор, сток. Транзисторы были изготовлены на гетероструктурах GaN/AlGaN/GaN, выращенных MOCVD-технологией на подложках SiC.

Для анализа структурных особенностей рабочих областей анализируемых кристаллов НЕМТ использовался атомно-силовой микроскоп (С-AFM). Общее сопротивление вжигаемых омических контактов И и С включает серию сопротивлений, соединенных последовательно: 1) «металлическая область» - композиция напыленных металлов и интерметаллических фаз, 2) модифицированный слой AlGaN, 3) оставшийся слой AlGaN и канал двумерного газа. Для оценки микроструктуры контактов анализировались особенности поверхностей на границе «металлическая область» модифицированный слой AlGaN, вскрываемые специальным травлением. Вскрываемые поверхности анализировались сканированием зондом Кельвина в контактном режиме с последующей оценкой микрорельефа этих поверхностей. Так же оценивалась однородность проводимости анализируемых участков поверхностей на микроскопе С-AFM с подачей потенциала между зондом и поверхностью, что позволяло сопо-

ставить неоднородность проводимости поверхности с особенностями её рельефа.

Установлено, что у разных кристаллов приборов микрорельеф «вскрытых» поверхностей областей И и С отличается достаточно сильно: от $R_z = 10 - 20 \text{ \AA}$ до $R_z = 200 - 3000 \text{ \AA}$. Наблюдается корреляция между величиной микрорельефа «вскрываемых» поверхностей и сопротивлением контактов. Кроме того, анализ «вскрытых» поверхностей двух анализируемых приборов показал наличие стержнеобразных дефектов (рис. 1а, 1б), причем в активных областях приборов плотность этих дефектов выше, чем в областях И и С. Исследование обнаруженных дефектов на С-AFM показало, что они имеют форму шипов высотой от 50 до 150 $\text{\AA}$ (рис. 1б, 1в). Для этих двух кристаллов характерны наиболее высокие значения сопротивления контактных областей. Полученные результаты так же показали, что сопротивления областей И и С ($R_{ис}$ и $R_{ст}$) в значительной мере определяются микроструктурой «металлической области» контакта. Появление высокой плотности стержневых дефектов может быть связано с дефектами фоторезиста. При напылении может происходить локальное попадание металлов на участки поверхности кристалла, в дальнейшем при проведении операции вжигания ($800 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$) на этих локальных местах происходит образование, так называемых, нитевидных кристаллов [1]. Исследования показали, что высокая плотность таких дефектов наблюдается на периферии областей И и С ряда приборов, причем у этих приборов наблюдаются более высокие токи утечки.

Таким образом, из вышесказанного следует, что технология вжигаемых металлических контактов при изготовлении AlGaIn/GaN HEMT требует жесткого соблюдения всех параметров технологического процесса их изготовления с возможным снижением температуры отжига и контролем равномерности ее распределения.

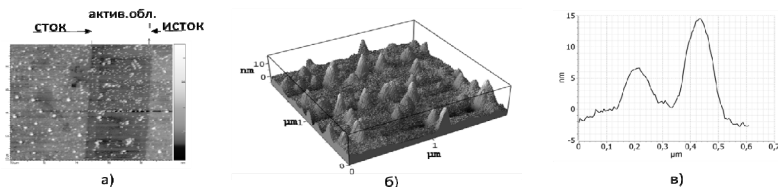


Рис. 1 Микрофотография областей И и С после травления (а), 3D изображение вскрытой поверхности прибора (б), поперечное сечение стержнеобразных дефектов (С-AFM) (в)

Литература

1. Е. И. Гиваргизов, Природа, 11 (2003).

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА КОНТАКТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ НЕСПЛАВНЫХ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К НИТРИДНЫМ ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ

****В.Ю. Павлов¹, А.Ю. Павлов¹, Д.Н. Славовский¹***

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, e-mail: vl-pavlov@mail.ru

INFLUENCE OF HEATING ON CONTACT RESISTANCE OF NONALLOYED OHMIC CONTACTS TO NITRIDE HETEROSTRUCTURES

****V.Yu. Pavlov¹, A.Yu. Pavlov¹, D.N. Slapovskiy¹***

¹V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS
Russia, 117105, Moscow, Nagornij proezd 7, e-mail: vl-pavlov@mail.ru

For nonalloyed ohmic contacts to nitride heterostructures with Cr/Pd/Au metallization composition to heavily doped GaN, when heated above 500 °C, an increase in contact resistance is observed due to the migration of gold to the metal – semiconductor interface. With prolonged heating of these ohmic contacts at 400° C for 10 hours, no change in the contact resistance occurred. Studies have shown that changes in the properties of ohmic contacts during heating does not occur in the process of manufacturing devices on nitride heterostructures.

Рост интереса к приборам на нитридных гетероструктурах приводит к улучшению как самих гетероэпитаксиальных структур, так и технологии изготовления этих приборов. Одним из этапов улучшения технологии, связанных с увеличением частотного диапазона работы приборов, является переход от сплавных технологий изготовления омических контактов к нитридным гетероструктурам к несплавной [1]. Поэтому оценка изменения свойств несплавных омических контактов после формирования металлизации при их нагреве, который происходит на разных этапах изготовления нитридных приборов, является целью данной работы.

В предыдущих работах были исследованы разные составы металлизации к сильнолегированному GaN и оценено влияние нагрева на деградацию контактного сопротивления. Наилучшую стабильность показали контакты с составом металлизации Cr/Pd/Au. Где Pd введен как диффузионный барьер для золота [2, 3]. В связи с этим дальнейшие исследования несплавных омических контактов были проведены с данным составом металлизации к сильнолегированному GaN.

Было оценено изменение удельного контактного сопротивления к сильнолегированному GaN (R_c) и к гетероструктуре AlGaIn/GaN (R_{ohm}), зависимость представлена ниже на рисунке 1. С ростом температуры

идет деградация контактного сопротивления к сильнолегированному GaN, что согласуется с экспериментальными данными из зарубежной литературы и связывают с миграцией золота к границе металл-полупроводник с последующей диффузией золота в GaN.

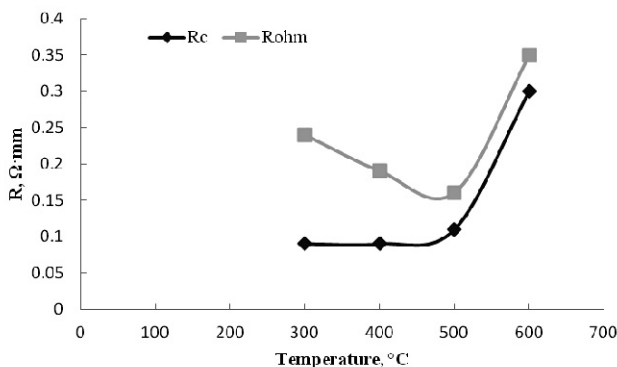


Рис. 1. Зависимость удельного контактного сопротивления к сильнолегированному GaN (R_c) и к гетероструктуре AlGaIn/GaN (R_{ohm}) от температуры

Так же была оценена длительная термическая стабильность несплавных омических контактов к нитридной гетероструктуре при нагреве до температуры 400 $^{\circ}\text{C}$ в течение 10 часов. Каждый час на образце проводилось измерение удельного контактного сопротивления. После первого часа произошло незначительное уменьшение контактного сопротивления, после чего остальное время контактное сопротивление не менялось. Таким образом, экспериментально показано, что при рабочих температурах изготовления и работе самих приборов исследуемые образцы несплавных омических контактов не меняют своих свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда поддержки образования и науки имени члена-корреспондента РАН Мокерова В.Г.

Литература

1. А.Ю. Павлов и др., Микроэлектроника, 46(5), 340-347 (2017).
2. А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, Письма в ЖТФ, 43(22), 96-103 (2017).
3. В.Ю. Павлов, А.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, (Мокеровские чтения. 9-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники: сборник трудов. М.: НИЯУ МИФИ), 48-49 (2018).

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ GaN

**Р.В. Захарченко¹, С.А. Шостаченко¹, М.С. Бурдыкин¹, Ю.А. Порохонько¹, Р.В. Рыжук¹,
Н.И. Каргин¹*

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: RVZakharchenko@mephi.ru

PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION OF OMIC CONTACTS FOR SEMICONDUCTOR DEVICES BASED ON GaN

**R.V. Zakharchenko¹, S.A. Shostachenko¹, M.S. Burdykin, Y.A. Porokhonko, R.V. Ryzhuk¹,
N.I. Kargin¹*

¹National Research Nuclear University MEPHI
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: RVZakharchenko@mephi.ru

In this paper, a technology was developed for forming high-quality ohmic contacts to HEMT and LED structures based on gallium nitride. A study was also conducted of the influence of contact systems on the volt-ampere characteristics of semiconductor devices.

Целью настоящей работы являлась разработка и исследование технологических процессов формирования омических контактов к транзисторам с высокой подвижностью электронов, а также к светоизлучающим диодам на основе GaN.

В результате оптимизации состава металлизации были получены следующие результаты.

Минимальное значение сопротивления омических контактов Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au к HEMT гетероструктуре на основе GaN составило 0,23 Ом×мм после термического отжига при 850 °С в течение 30 секунд (рис.1).

Для формирования омического контакта к р-GaN светоизлучающей анодной области была выбрана стехиометрическая (9:1) смесь оксидов индия и олова (ITO).

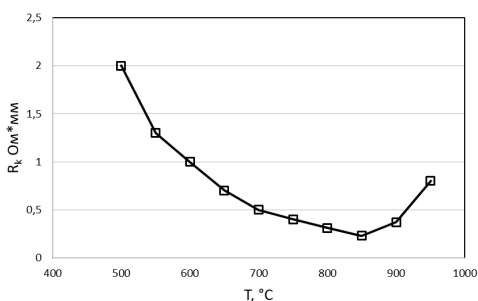


Рис. 1. Измерение значения удельного сопротивления омических контактов в зависимости от температуры отжига

Проведение быстрого термического отжига в течение 30 секунд в атмосфере азота и/или кислородосодержащей среде, обеспечивает понижение поверхностного сопротивления до значения $8,6 \text{ Ом/}\square$ и оптическое пропускание в видимой области спектра более 85 % (рис. 2).

Максимальное удельное значение крутизны транзистора при непрерывном режиме измерения составляет $290 \text{ мА/(В}\cdot\text{мм)}$ (рис. 3).

ВАХ полученных в данной работе светодиодных структур с контактами из пленки ИТО без нанесения на нее металлизации приведены на рис. 4.

По вольт-амперным характеристикам, представленным на рис. 4, видно, что ток растет с ростом напряжения нелинейно. При одинаковом прямом токе через диодную структуру равном 20 мА (плотность тока составляла $13,2 \text{ А/см}^2$) напряжение на диоде было 4,5 В после отжига при 550°C , 3,95 В после 600°C и 3,4 В после 650°C .

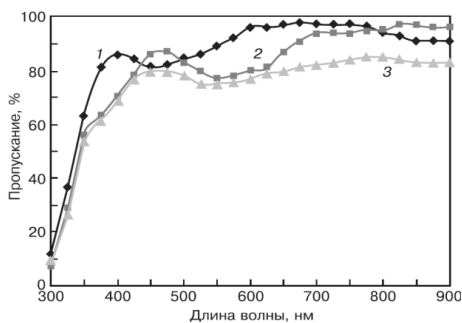


Рис. 2. Относительное пропускание в оптическом диапазоне пленок, полученных в различных режимах нанесения и последующего отжига в воздухе: №1 — без напуска кислорода, после отжига 30 с при 600°C , №2 — с напуском кислорода, после отжига 30 с при 600°C и №3 — без напуска кислорода, после отжига 2 часа при 450°C

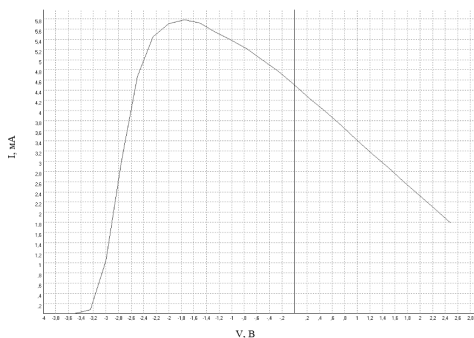


Рис. 3. Зависимость крутизны транзистора от напряжения на затворе

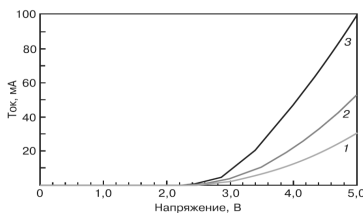


Рис. 4. ВАХ светодиодной структуры с контактом из пленки ИТО после отжига в воздухе при различных температурах: 550°C (1), 600°C (2), 650°C (3)

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ
В GaAs ПРИ ПОМОЩИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ**

****П.С. Васильев¹, М.В. Драгут¹, Е.В. Кузьмин¹, Д.А. Усик¹***

¹АО «ОКБ-Планета»

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

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE FORMATION OF THROUGH HOLES
IN GaAs USING PLASMA CHEMICAL ETCHING**

****P.S. Vasilev¹, M.V. Dragut¹, E.V. Kuzmin¹, D.A. Usik¹***

¹АО “ОКБ-Планета»

Russia, 173004, Veliky Novgorod, Fedorovskiy ruchey st., 2/13,
e-mail: vasilevps@okbplaneta.ru

The aim of this work was to optimize the process of plasma-chemical etching of holes in gallium arsenide to a depth of 150 microns. A number of experiments were conducted to determine the effect of changes in various parameters on the etching rate of the mask and anisotropy. Etching was carried out in plasma Cl₂/BCl₃/Ar. A suitable mask material was selected – a positive photoresist FP-25, applied in two layers. The initial diameter of the holes was 70 microns. As a result, through holes of the desired shape were obtained, with a suitable etching rate and preservation of the masking coating.

При производстве СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) на основе GaAs существует необходимость в создании элементов заземлений, реализованных с помощью металлизированных сквозных отверстий.

Целью данной работы являлось получение сквозных отверстий в пластинах арсенида галлия, толщиной до 150 мкм. В настоящей работе формирование отверстий производилось травлением в индуктивно-связанной плазме (ICP-RIE) на установке SI-500I, ф. Sentech Instruments. В качестве реакционной газовой среды была использована система газов Cl₂/BCl₃/Ar, которая с успехом применяется для глубокого направленного травления GaAs [1]. Проведя ряд экспериментов, был определен оптимальный режим ПХТ, позволяющий получить отверстия подходящей формы. В ходе работы было произведено сравнение двух принципиально различных типов масок: металлической и фоторезистивной. Более технологичной оказалась маска из фоторезиста [2].

Основной проблемой, решаемой в ходе работы, была недостаточная стойкость фоторезистивной маски при травлении на большую глубину. В следствии этого, был проведен ряд экспериментов по подбору оптималь-

ного состава плазмы и режима ПХТ. В результате экспериментов было определено оптимальное соотношение газов Cl_2/BCl_3 (40/20 sccm).

Минимальная толщина маски из фоторезиста, способная выдержать ПХТ в выбранном режиме на глубину 150 мкм, должна составлять 15 мкм. Поэтому, из доступного набора резистов был использован фоторезист ФП-25, нанесенный в два слоя. Вид маски после ПХТ показан на рис. 1. Наилучшая анизотропия, стойкость маски и приемлемая скорость травления была получена при расходе Ar 5 sccm. Травление проходило в несколько циклов, и общее время травления составило 120 мин. Профиль отверстия представлен на рис. 2.

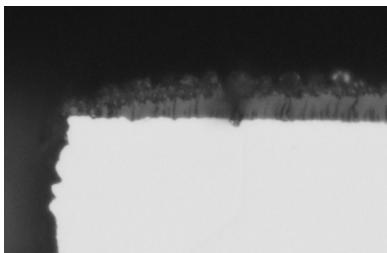


Рис. 1. Вид фоторезистивной маски после ПХТ

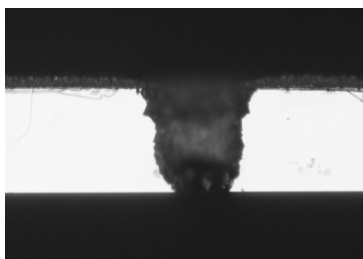


Рис. 2. Профиль сквозного отверстия в пластине, толщиной 150 мкм

Полученные результаты можно использовать для направленного плазмохимического травления арсенида галлия, в целях получения сквозных отверстий в пластинах толщиной до 150 мкм.

Литература

1. J. Lee, H. Tsai, Y.-Sh. Chang, Mat. Sci. and Eng., National Tsing-Hua University Hsin-Chu, Taiwan, ROC.
2. П.С. Васильев, М.В. Драгутъ, Д.М. Мишарин, Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА (Материалы XV научно-технической конференции. г. Дубна, 2017).

ВЛИЯНИЕ ПАССИВИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК НА ДРЕЙФ ПАРАМЕТРОВ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ МИС И ТРАНЗИСТОРОВ

**Ю.Ю. Смирнов¹, М.В. Драгут¹, Д.М. Мишарин¹*

¹ОКБ-Планета

Россия, 173000, г. Великий Новгород, ул. Фёдоровский ручей, дом 2/13,

e-mail: smirnovyy@okbplaneta.ru

IMPACT PASSIVATION PROPERTIES OF DIELECTRIC FILM ON DRIFT PARAMETERS GaAs MMIC AND TRANSISTORS

**U.U. Smirnov¹, M.V. Dragut¹, D.M. Misharin¹*

¹OKB-Planeta

Russia, 173000, Velikiy Novgorod, Fedorovskiy ruhei, 2/13,

e-mail: smirnovyy@okbplaneta.ru

In this work we present effects of Si_3N_4 , SiO_2 and baking photoresist film on time drift saturate current of GaAs transistor at operation condition. Surface states is a main origin of time instability of drain current for transistors and time instability of supply current and gain for amplifier.

Помимо улучшения характеристик МИС и дискретных приборов на основе гетеро-/гомоэпитаксиальных структур арсенида галлия, большое внимание уделяется проблемам надёжности и стабильности. Например, в рабочем режиме у усилителя может проявляться нестабильность тока потребления (<5%) и коэффициента усиления (<10%), т.е. наблюдается дрейф характеристик (рис. 1).

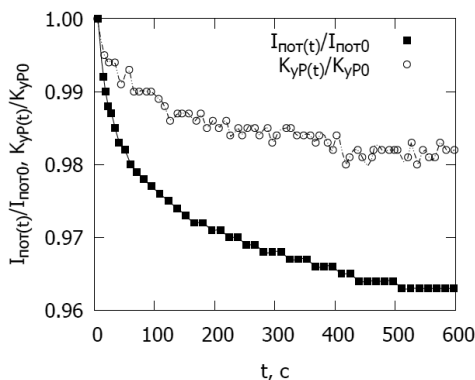


Рис. 1. Временная нестабильность тока потребления и коэффициента усиления МШУ, пассивированного плёнкой SiO_2 ($f = 1 \text{ ТГц}$)

Нестабильность параметров может быть вызвана ловушками, расположенными на границе раздела между активным и буферным слоем, ловушками на поверхности активного слоя, фиксированным зарядом и ловушками в диэлектрике, ловушками в активном слое. Считается [1], что поверхностные состояния, большая плотность которых (10^{12} - 10^{13} см^{-2}) характерна для арсенида галлия, являются основной причиной, приводящей к временной нестабильности тока

стока транзистора и коэффициента усиления МИС. Уменьшить величину дрейфа характеристик можно нанесением диэлектрических плёнок, влияющих на электрофизические характеристики поверхности арсенида галлия, т.е. обладающих пассивирующими свойствами.

В данной работе в качестве пассивирующих покрытий использовались следующие диэлектрические плёнки: Si_3N_4 , толщиной (250–300) нм (плазмохимическое осаждение), SiO_2 , толщиной (250–300) нм (химическое осаждение из газовой фазы) и задубленный фоторезист. Эффективность пассивации оценивалась на MESFET транзисторах, а не на МИС, что обусловлено более простой и быстрой технологией изготовления. Кроме того, это позволяет исключить возможный вклад в дрейф параметров МИС изменение характеристик других интегральных элементов. Используемые транзисторы были изготовлены на гомоэпитаксиальных структурах с уровнем легирования активного слоя $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, длина затвора 1 мкм, ширина затвора 3200 мкм. Перед нанесением пассивирующих плёнок пластина с транзисторами прошла химическую обработку в диметилформамиде (50 °С) и аммиачном травителе. После этого пластина делилась на 4 части. Одна из частей выступала в качестве контрольного образца без пассивации.

Измерение влияния пассивирующей плёнки проводилось следующим образом: исток и затвор транзистора заземлялись, на сток подавалось напряжение 1,5 В, в автоматическом режиме фиксировалась величина тока стока в течение 10 минут. Критерием эффективности пассивации выступала величина относительного изменения тока стока. Кроме этого, фиксировался обратный ток затвора при напряжении 5 В. Измерения проводились на 8 транзисторах для каждого варианта пассивации. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Эффективность пассивации

Параметр	Без пассивации	Si_3N_4	SiO_2	Задубленный фоторезист
$I_{\text{обр}}, \text{ мкА}$	0,8-0,9	<0,01	13-26	0,6-0,71
$\Delta I_{\text{нас}}, \%$	8-16	<2	2-6	2-8

Наилучшие результаты получены для Si_3N_4 . Стоит отметить, что на образцах, пассивированных Si_3N_4 и SiO_2 в некоторых случаях ток стока не уменьшался, а несколько возрастал.

Литература

1. J.G. Tenedorio, P.A. Terzian, IEEE Electron dev. lett., 199, 6 (1984).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ
AlGaN/AlN/GaN С ПОДЗАТВОРНЫМ ЗАГЛУБЛЕНИЕМ**

****А.Ю. Павлов¹, К.Н. Томош¹, Р.Р. Галиев¹, В.Ю. Павлов¹, А.В. Зыев¹***

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, e-mail: alexup@bk.ru

INVESTIGATION HEMT AlGaN/AlN/GaN WITH RECESS

****A.Yu. Pavlov¹, K.N. Tomosh¹, R.R. Galiev¹, V.Yu. Pavlov¹, A.V. Zhev¹***

¹V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS
Russia, 117105, Moscow, Nagornij proezd 7, e-mail: alexup@bk.ru

In the production of HEMT AlGaN/AlN/GaN, the previously proposed method of low-energy defect-free dry etching of nitride layers was used, consisting in cyclic repetition of the plasma-chemical oxidation of these layers and removal of the formed oxide layer by reactive ion etching in an inductively coupled BCl₃ plasma. AlGaN/AlN/GaN transistors with and without recess were fabricated on the same AlGaN/AlN/GaN heterostructure. The introduction of the recess into the manufacturing route made it possible to raise the maximum specific steepness of the transistor from 300 mS/mm to 330mS/mm. Transistors operating at positive gate bias were also obtained.

Развитие работ по созданию приборов на нитридных гетероструктурах требует улучшения характеристик полевых транзисторов и изменения технологий, обеспечивающих лучшую воспроизводимость параметров и технологичность их изготовления. При формировании полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN возникает необходимость приближения затвора к каналу гетероструктуры. Это обеспечивается изготовлением гетероструктур с требуемой толщиной барьерного слоя AlGaN [1], либо изменением его толщины за счет травления. Ранее нами сообщалось о разработке способа низкоэнергетичного бездефектного сухого травления нитридных слоев, заключающегося в циклическом повторении операций плазмохимического окисления этих слоев и удалении образованного оксидного слоя реактивным ионным травлением в индуктивно-связанной плазме BCl₃[2]. С использованием данного способа, который был включен в технологический цикл изготовления полевых транзисторов, была изготовлена серия транзисторов с разной степенью заглубления в барьерный слой гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN (реcess). Так же были изготовлены на этой же гетероструктуре транзисторы без подзатворного заглубления. С полученных транзисторов были сняты

статические и динамические характеристики. Зависимости удельной крутизны и удельного тока стока для полученных транзисторов для сравнения показаны на рис. 1.

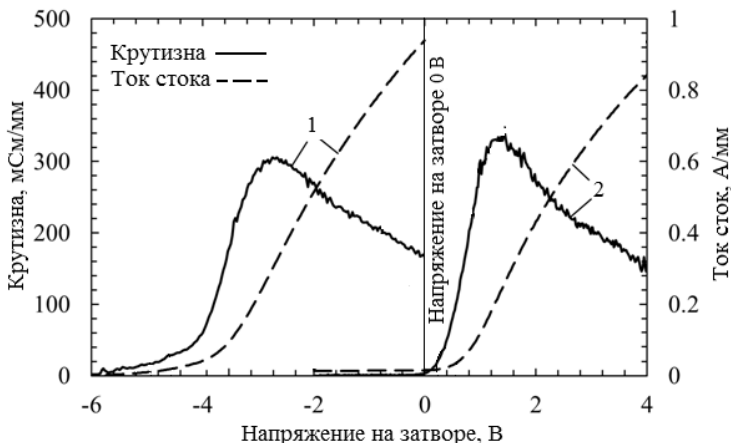


Рис. 1. Зависимости удельных крутизны и тока стока от напряжения на затворе при напряжении сток-исток 5 В для транзисторов без подзатворного заглабления (1) и с подзатворным заглаблением (2)

Использование рецесса позволяет регулировать максимальную удельную мощность нитридных транзисторов, так как она определяется аспектным соотношением длины затвора к толщине барьерного слоя гетероструктуры L_G/t_b . При этом уменьшение толщины барьерного слоя гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN приводит к росту частотных характеристик прибора и напряжения пробоя. Так же использование рецесса позволяет получать транзисторы, работающие при положительных смещениях на затворе, что видно на рис. 1 для транзистора с подзатворным заглаблением. При приближении затвора к каналу происходит увеличение крутизны.

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

Литература

1. К.С. Журавлев и др., Письма в ЖТФ, 42(14), 72-79 (2016).
2. С.В. Михайлович и др., Письма в ЖТФ, 44(10), 61-67 (2018).

РАЗРАБОТКА МАЛОШУМЯЩИХ PHEMT И MHEMT 0,15 мкм ТРАНЗИСТОРОВ НИЯУ МИФИ

**И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, Н.В. Антонова, А.В. Аврамчук, Р.В. Захарченко,
М.С. Бурдыкин, Я.Б. Литун, Р.В. Рыжук, А.А. Горелов, Н.И. Каргин, М.Н. Стриханов*

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

DEVELOPMENT OF LOW NOISE 0.15 μm PHEMT AND MHEMT TRANSISTORS

**I.S. Vasil'evskii, A.N. Vinichenko, N.V. Antonova, A.V. Avramchuk, R.V. Zakharchenko, M.S.
Burdykin, Y.B. Litun, R.V. Ryzhuk, A.A. Gorelov, N.I. Kargin, M.N. Strikhanov*

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

The results of low noise transistors (LNT) development at NRNU MEPhI based on 0.15 μm PHEMT and MHEMT structures are presented. The demands for LNT layers structure and physical parameters are discussed.

Разработка НЕМТ малошумящих транзисторов (МШТ) имеет особенности, отличающие МШТ от других усилительных устройств, где основным требованием обычно является высокий ток стока и достаточно высокая крутизна транзистора. В НИЯУ МИФИ проведена разработка МШТ по PHEMT и MHEMT 0.15 мкм технологии на собственных эпитаксиальных гетероструктурах [1, 2].

Общепринятые шумовые модели НЕМТ МШТ различаются степенью эмпиричности и удобством применения. Нетривиальность задачи состоит в том, что ряд параметров в стандартных шумовых моделях не являются независимыми. На основе модели Фукуи [3] нами было предложено перейти к представлению через физические параметры структуры, в этом случае коэффициент шума на частоте f выражается как:

$$F_{\min}(f) = 1 + k_F \frac{f}{v_s} 2\pi L_g \sqrt{\epsilon_b \frac{U_d}{L_b + d_s} (R_G + R_S)},$$

где коэффициент Фукуи составляет для InGaAs канала $K_F \sim 0.95$, ϵ_b – отн. диэлектрическая проницаемость барьера Шоттки, U_d – напряжение на стоке, L_b – толщина барьера Шоттки и d_s – толщина спейсерного слоя (в сумме они равны глубине залегания канала относительно затвора). Из данной модели следует, что необходимо увеличивать дрейфовую скорость насыщения электронов v_s при возможно меньших смещениях на стоке U_d , а глубина залегания канала не должна быть слишком мала при

одновременно малой длине затвора L_g ; сохраняется традиционное требование минимизации паразитных сопротивлений истока R_S и затвора R_G .

При разработке МШТ применены следующие подходы: оптимизация РНЕМТ и МНЕМТ гетероструктур, секционирование транзистора ($n = 4$ и 6) и увеличение площади сечения затвора для снижения R_g , асимметричное расположение затвора. Реализована технология воздушных мостов с термическим напылением золота.

Были получены следующие параметры оптимизированных гетероструктур: РНЕМТ – $n_s \sim 1.9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu_n = 6860 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при (295 К) и $22300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (77 К); МНЕМТ – $n_s \sim 1.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu_n = 10800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при (295 К) и $34000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (77 К). В результате оптимизации жидкостного рецесса были получены при $L_g \sim 0.15 \text{ мкм}$ следующие параметры: крутизна $G \sim 500 \text{ мСм/мм}$, пробивное напряжение по затвору U_{bdG} до минус 4 В (РНЕМТ); $G \sim 800 \text{ мСм/мм}$, U_{bdG} до минус 3.5 В (МНЕМТ). Фото топологии и ВАХ РНЕМТ МШТ приведены на рис. 1 и 2, соответственно.

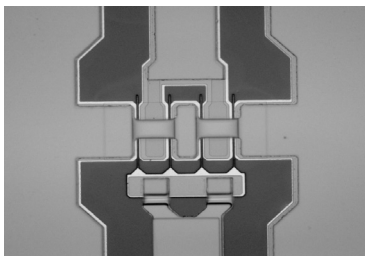


Рис. 1. Вид топологии малошумящих транзисторов НИЯУ МИФИ

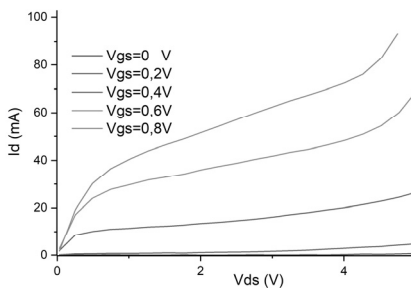


Рис. 2. ВАХ РНЕМТ малошумящих транзисторов НИЯУ МИФИ

Транзисторы характеризованы по статическим и СВЧ параметрам, согласованы по выходу на 50 Ом. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения Государственного задания (№ 8.3887.2017/ПЧ).

Литература

1. А.Н. Виниченко и др., ФТП, 53(3), 359 (2019).
2. Д.А. Сафонов и др., ФТП, 52(2), 201 (2018).
3. Н. Fukui, IEEE Trans. Micr. Theory Techn., MTT-27, 643–650 (1979).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВУХКАСКАДНОГО СВЧ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ LOAD-PULL

А.А. Горелов¹, Н.И. Каргин¹, *Р.В. Рыжук¹

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

SIMULATION OF THE MICROWAVE TWO-STAGE POWER AMPLIFIER BY LOAD-PULL TECHNIQUES

А.А. Gorelov¹, N.I. Kargin¹, *R.V. Ryzhuk¹

¹National Research Nuclear University «MEPhI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: ryzhuk-rom@yandex.ru

In this work, a Ku-band power amplifier was developed based on the Angelov 2 model using the load pull method. As a result, device gain values of more than 15dB were achieved in the frequency range from 28 to 32 GHz. Input signal power ranged from -30 dBm to 0 dBm. The PAE of the power amplifier was more than 30% for the $f_0 = 30$ GHz.

В настоящее время тенденция развития всех сфер деятельности общества предъявляет все более строгие требования к высокой скорости передачи цифровых потоков, обработки и объемам передаваемых данных. Необходимость использования сверхвысоких частот связана с развитием систем связи, что влечет за собой активное развитие СВЧ приборов, в частности, усилителей мощности (УМ). При этом один из основных параметров этих приборов – коэффициент усиления, как правило, находится в обратной зависимости от частоты сигнала [1]. Поэтому одной из основных проблем при разработке таких устройств, кроме сохранения высокого коэффициента усиления в данной полосе частот, заключается в синтезе входных, выходных и межкаскадных цепей согласования, позволяющих обеспечить стабильность и оптимальный КПД устройства. Структурная схема усилителя мощности, состоящего из двух каскадов представлена на рис. 1.

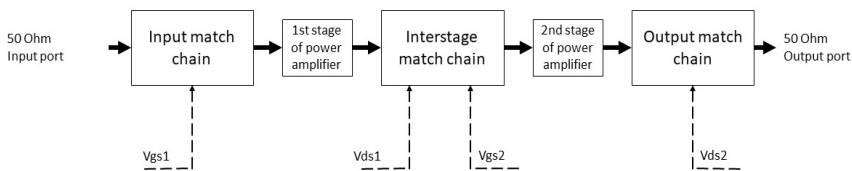


Рис. 1. Структурная схема 2-х каскадного усилителя мощности

Целью данной работы являлась разработка усилителя мощности, имеющего коэффициент усиления по мощности не менее 15 dB в полосе частот 28 – 32 ГГц на основе встроенной модели ANGELOV 2. Для синтеза цепей согласования был использован метод выделения импеданса (load pull). Синтез проводился в программном обеспечении Microwave office компании National instruments [2]. Принципиальная схема разрабатываемого УМ и зависимости изменения коэффициента усиления от частоты сигнала и уровня входной мощности, полученные путем оптимизации входных и выходных цепей согласования представлены на рис. 2.

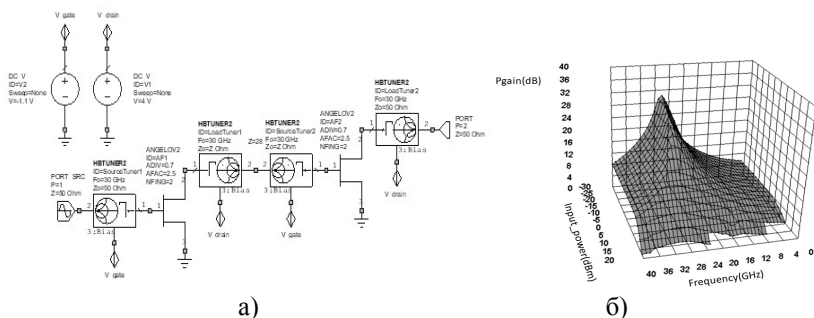


Рис. 2. Принципиальная схема реализации метода Load-pull для синтеза цепей согласования в САПР Microwave office (а) и зависимость коэффициента усиления от частоты и входной мощности (б)

В результате были достигнуты значения коэффициента усиления УМ более 15dB на полосе частот от 28 до 32 ГГц, при уровне входной мощности сигнала от -30 dBm до 0 dBm. Полученный КПД устройства при этом составил более 30% на центральной частоте, что соответствует значению КПД большинства коммерчески доступных приборов.

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

Литература

1. А.А. Коколов, М.В. Черкашин, (Построение и характеристики СВЧ монолитных усилителей мощности на основе полупроводниковых материалов GaAs и GaN, Доклады ТУСУРа) 2(24) (2011).
2. User Guide NI AWR Design Environment v13.03 Edition.

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СВЧ GaN УСТРОЙСТВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ
МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА AlSiC**

****А.А. Золотарев¹***

¹АО «НПП «Пульсар»

Россия, 105187, г. Москва, Окружной пр., 27 e-mail: zolotarev.alexey@mail.ru

**IMPROVING THE RELIABILITY OF MICROWAVE DEVICES WHEN USING
AlSiC-BASED METAL-MATRIX COMPOSITE**

****А.А. Zolotarev¹***

¹JSC «S&PE «Pulsar»

Russia, 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27, e-mail: zolotarev.alexey@mail.ru

The One of the main factors for improving the performance of modern microwave devices is the use of wide-gap semiconductors, such as gallium nitride, in their composition. However, the reliability of such devices with increasing output power drops, as the deformation of the crystal appears relative to the body of the device due to a mismatch of thermal coefficients of linear expansion. To solve this problem, a new case material is used, made of a Al-SiC-based metal-matrix composite.

Современные полупроводниковые приборы создаются с применением широкозонных материалов, таких как нитрид галлия [1]. Его применение позволяет создавать радиоэлектронные приборы с рекордными значениями удельной мощности, КПД и стойкостью к воздействию специальных факторов [2]. Повышение мощности полупроводниковых приборов приводит к повышению температурного поля, что в свою очередь влияет на надежность работы из-за возникновения деформаций. Разработчики радиоэлектронной аппаратуры обычно применяют медь и сплавы на ее основе, например, МД-40, для исключения вредного влияния повышенного температурного поля. Однако в последнее время появились новые композиционные материалы на основе алюминия и карбида кремния (AlSiC), обладающие плотностью меньшей, чем плотность МД-40 в несколько раз, а также обладающие стабильными размерными характеристиками [3–4].

Для оценки деформации корпуса полупроводникового прибора было проведено компьютерное моделирование, основанное на численных методах, таких как метод конечных элементов, который широко используется в современных программных комплексах типа ANSYS. По условию задачи было смоделирован корпус полупроводникового прибора с установленным в него полевым транзистором с барьером Шоттки (рис.1).

В качестве материалов корпуса рассматривались композит AlSiC и псевдосплав МД-40. В математической модели помимо параметров материала, учитывались такие прочностные характеристики, как коэффициент Пуассона, модуль Юнга и коэффициенты линейного расширения. По условию компьютерного моделирования, транзистор работал в непрерывном режиме с мощностью тепловыделения 133 Вт (максимальный режим тепловыделения), 56 Вт (режим работы без СВЧ сигнала) 79.3 Вт (режим среднего тепловыделения). Результаты компьютерного моделирования деформации корпусов, изготовленных из AlSiC и МД-40, представлены в таблице 1.

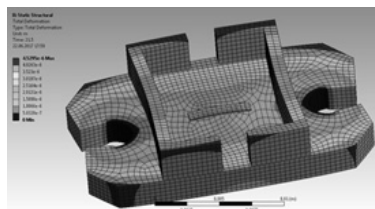


Рис. 1. Модель корпуса полупроводникового прибора

Таблица 1

Результаты компьютерного моделирования деформации корпусов

Тип материала	Тепловая мощность		
	56Вт	79.3Вт	133Вт
AlSiC	4.4 мкм	4.44 мкм	4.53 мкм
МД-40	5.49 мкм	5.52 мкм	5.61 мкм

Данные компьютерного моделирования позволяют сказать, что полупроводниковый прибор с корпусом, изготовленным из металломатричного композита AlSiC имеет меньшую деформацию, чем прибор с корпусом, изготовленным из псевдосплава МД-40.

Применение металломатричного композита AlSiC в полупроводниковых СВЧ GaN устройствах увеличивает надежность работы и дает преимущество в весовых характеристиках.

Литература

1. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев, Электронная техника, сер.2, Полупроводниковые приборы, 2(231), 88-101 (2013).
2. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев, Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 12(2), 201-207 (2016).
3. K. Gilio, (MEMS/MOEMS Packaging Concepts, Designs, Materials, and Processes. McGraw-Hill Nanos- science and Technology Series, Chicago, NY) 239 p. (2005).
4. А.А. Золотарев, Электронная техника, сер.2., Полупроводниковые приборы, 2(249), 48-52 (2018).

ТЕПЛОПЕРЕНОС В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

**Д.А. Чернодубов¹, А.В. Инюшкин¹*

¹Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт»

Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1,

e-mail: Chernodubov_DA@nrcki.ru

THERMAL TRANSPORT IN GALLIUM NITRIDE THIN-LAYERED STRUCTURES

**D.A. Chernodubov¹, A.V. Inyushkin¹*

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”

Russia, 123182, Moscow, Akademika Kurchatova sq., 1, e-mail: Chernodubov_DA@nrcki.ru

Thermal transport of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ thin-layered structures has been measured with the 3-omega method at room temperature. Thermal boundary resistance has been estimated. The measured values were used in calculation of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ stacks thermal resistance, which may be used for thermal management optimization of GaN-based devices.

В настоящее время в высокочастотной и высокоомощной электронике широко используются полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ), изготовленные на основе гетеропереходов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ [1]. Достигаемая в этих устройствах плотность мощности превышает 30 Вт/мм [2], и значительный разогрев устройства является главным фактором, ограничивающим рабочую мощность ТВПЭ, таким образом, проблема теплоотвода является актуальной для этих устройств. Увеличение теплопроводности слоев, составляющих структуру, и уменьшение граничных тепловых сопротивлений между ними положительно отразится на достижимой мощности транзисторов с их использованием [3].

Теплоперенос в рассматриваемых ТВПЭ определяется как теплопроводностью самого GaN, так и теплопроводностями подложки и буферных слоев. Соответственно, представляет интерес измерение теплопроводности сапфира (Al_2O_3) и слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, на которых происходит рост, и самого GaN в составе многослойной структуры. Известно, что при относительно высокой теплопроводности как AlN, так и GaN (порядка $3,2 \text{ Вт/см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ и $2,3 \text{ Вт/см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, соответственно, для объемных кристаллов при комнатной температуре), теплопроводность $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ меньше этих величин на порядок даже без учета влияния размеров пленки. Этот факт, наряду с разницей фононных спектров в материалах структуры, приводит к возникновению эффективных граничных сопротивлений порядка $50 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$ [4].

В данной работе была исследована теплопроводность гетероэпитаксиальных структур $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Образцы наносились на сапфировую подложку толщиной 0,4 мм методом молекулярно-лучевой эпитаксии, общая толщина буферных слоев смешанного состава $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ составляет 0,6 мкм, толщина плёнки нитрида галлия – 1,5 мкм.

Измерения теплопроводности проведены усовершенствованным методом 3-омега [5]. На образцы методом фотолитографии на слой хрома толщиной 30 нм были нанесены золотые нагреватели-термометры толщиной 200 нм, длиной 2 мм и ширинами от 5 до 40 мкм, с помощью которых была измерена эффективная теплопроводность сапфира и теплопроводности тонких пленок $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и GaN вдоль кристаллографической оси c . С учетом полученных значений было рассчитано значение эффективного граничного теплового сопротивления и смоделирован теплоперенос в структуре ТВПЭ.

Полученные в работе результаты измерений согласуются с опубликованными данными других авторов [6] и могут быть использованы для улучшения теплового поведения устройств на основе GaN.

Представленная работа проведена при частичной поддержке НИЦ «Курчатовский институт» и РФФИ (грант номер 19-07-00229).

Литература

1. M. Kuzuhara, H. Miyamoto, Y. Ando, T. Inoue, Y. Okamoto, and T. Nakayama, *Phys. Status Solidi A*, **200**, 161 (2003).
2. Y.-F. Wu, A. Saxler, M. Moore, R. P. Smith, S. Sheppard, P. M. Chavarkar, T. Wisleder, U.K. Mishra, and P. Parikh, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **25**, 117 (2004).
3. K. Park and C. Bayram, *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 151904 (2016).
4. A. Manoi, J.W. Pomeroy, N. Killat, and M. Kuball, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **31**, 1395 (2010).
5. D.A. Chernodoubov, A.V. Inyushkin, *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 024904 (2019).
6. C. Hodges, J. Anaya Calvo, S. Stoffels, D. Marcon, and M. Kuball, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 202108 (2013).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИОДОВ ШОТТКИ
С ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫМИ СЛОЯМИ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ**

*А.В. Желаннов¹, М.Н. Петров², Б.И. Селезнев², *Д.Г. Федоров¹*

¹ОАО «ОКБ-Планета»

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

e-mail: FedorovDG@okbplaneta.ru

²Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,

Россия, 173003, г. Великий Новгород, Б. С.-Петербургская, 41

**SIMULATION OF SCHOTTKY DIODES WITH ION-DOPED LAYERS
ON GALLIUM NITRIDE**

*A.V. Zhelannov¹, M.N. Petrov², B.I. Seleznev², *D.G. Fedorov¹*

¹JSC «OCB - Planet», Russia, 173004, Velikiy Novgorod ul. Fedorovskiy ruchey, 2/13,

e-mail: FedorovDG@okbplaneta.ru

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,

173003, Velikiy Novgorod. ul Bolshaya St.Petersburgskaya, 41

Discusses the synthesis of a compact (SPICE) model of the Schottky diode on GaN. Implemented on the basis of a modified model of a conventional diode at the p-n junction by extracting its constituent parameters from the experimental data: VAC, VFC and temperature dependences of the Schottky diode current. To create diode structures, epitaxial layers of gallium nitride grown by MOCVD on a sapphire substrate were used. Ohmic contacts of diode structures were formed on ion-doped epitaxial layers.

Структуры с барьером Шоттки на основе нитрида галлия представляют большой интерес как перспективные компоненты для создания приборов силовой электроники, мощных СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем, инжекционных лазеров и светодиодов. В работах [1,2] показана перспективность использования ионной имплантации для формирования омических контактов на нитриде галлия. В настоящей работе для изготовления диодных структур использовались образцы GaN, выращенные методом MOCVD на сапфировой подложке диаметром 2 дюйма.

Омические контакты диодных структур формировались на p^+ ионно-легированных слоях. Ионное легирование кремнием осуществлялось на установке «Везувий-1» с энергией 50 кэВ и дозой 10^{15} см^{-2} . Для активации примеси использовался фотонный отжиг при температуре 1250 °С в среде азота. В качестве защитных покрытий при отжиге использовались пленки SiO_2 [3].

В качестве металлизации омических контактов была выбрана система Ti/Al/Ni/Au с соответствующими толщинами 50/4000/20/150 нм. Contac-

ты Шоттки площадью $9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ формировались на основе двухслойной системы металлизации Ni/Au и имели толщины 20 нм и 150 нм соответственно.

В качестве инструментария, используемого для отладки и оптимизации технологического процесса изготовления диода Шоттки, в данной работе наряду с традиционными методиками предложено использование его компактной модели.

Синтез компактной (SPICE) модели диода Шоттки реализован на базе модифицированной модели обычного диода на p-n переходе путем экстракции входящих в ее состав параметров из экспериментальных данных: ВАХ, ВФХ и температурных зависимостей тока диода Шоттки.

Для экстракции параметров компактной модели разработан комплекс алгоритмов на базе двух типов численных методов: полиномиальной аппроксимации методом наименьших квадратов и методики, основанной на математическом аппарате теории оптимизации. Программная реализация алгоритмов выполнена с использованием языка программирования MATLAB.

Дополнительным преимуществом данного подхода является возможность экстракции ряда электрофизических параметров: высоты барьера Шоттки, концентрации примесей в подложке, плотности поверхностных состояний на границе раздела металл-полупроводник, постоянной Ричардсона, падения напряжения для прямого смещения и плотности тока, при которой начинается саморазогрев диода. Хотя перечисленные параметры не являются параметрами компактной модели, тем не менее, они крайне важны с точки зрения оценки качества технологического процесса изготовления диода.

Результатом выполнения данной работы является экстракция из экспериментальных данных восьми параметров SPICE модели диода Шоттки на GaN, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1

Экстрагированные параметры диода Шоттки

I_s , А	n	R_s , Ом	BV , В	IBV , А	CJO , пФ	VJ , В	M
$8.21 \cdot 10^9$	1.25	9.173	97.5	$19 \cdot 10^4$	7.484	1.027	0.319

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

Литература

1. F. Recht, L. McCarthy et al., IEEE Electron Dev. Lett., **27**(4), 205 (2006).
2. A. V. Zhelannov, B. I. Seleznev, IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng. 441, 012045 (2018).
3. Б.И. Селезнев, Г.Я. Москалев, Д.Г. Федоров, ФТП, **50**(6), 848-853 (2016).

ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ С ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫМИ ПОДКОНТАКТНЫМИ СЛОЯМИ К ПРИБОРНЫМ СТРУКТУРАМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

**А.В. Желаннов¹, А.С. Ионов¹, Б.И. Селезнев², Д.Г. Федоров¹*

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

OMIC CONTACTS WITH THE ION-DOPED LAYERS POKONTAKTNUYU TO THE INSTRUMENT STRUCTURES BASED ON GALLIUM NITRIDE

**A.V. Zhelannov¹, A.S. Ionov¹, B.I. Seleznev², D.G. Fedorov¹*

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

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
173003, Velikiy Novgorod. ul Bolshaya St.Petersburgskaya, 41

Estimates of non-alloy ohmic Cr/Pt/Au contacts to epitaxial GaN structures and traditional Ti/Al/Ni/Au alloy contacts to AlGaN/GaN heterostructures with subcontact ion-doped layers are presented. The ohmic characteristics of the Cr/Pt/Au contacts are maintained up to an annealing temperature of 600 °C. For AlGaN/GaN heterostructures, the introduction of ion implantation through a 50 nm thick SiO₂ mask and the use of a silicon sublayer allow to reduce the specific contact resistance of ohmic contacts.

Одним из важных этапов формирования приборных структур на нитриде галлия является создание омических контактов. В настоящее время имеются сведения об использовании как сплавных, так и несплавных систем омических контактов к структурам на основе полупроводниковых нитридов [1]. Для формирования несплавных омических контактов используется технология селективного выращивания сильнолегированного слоя p^+ -GaN [2].

В данной работе для формирования p^+ -GaN слоя использовалась технология ионной имплантации Si в слои $Al_xGa_{1-x}N$ [3]. Проведена оценка несплавных омических контактов Cr/Pt/Au к структурам GaN и сплавных омических контактов Ti/Al/Ni/Au к структурам $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ с подконтактными ионно-легированными слоями.

Контакты Cr/Pt/Au и Ti/Al/Ni/Au формировались электронно-лучевым напылением системы металлизации с помощью взрывной фотолитографии.

Ионная имплантация в структуры $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ проводилась через предварительно сформированную маску SiO₂ толщиной 50 и 100 нм. Вы-

бор толщины маски определялся расчетом средней проецированной длины пробега в системе AlGaIn для получения максимальной концентрации примеси на глубине залегания двумерного электронного газа.

Контакты на основе системы Cr/Pt/Au непосредственно после формирования показывали омические характеристики с их сохранением вплоть до температур отжига 600 °С, при этом сравнительно слабо изменяется величина удельного контактного сопротивления.

Контакты на основе системы Ti/Al/Ni/Au непосредственно после формирования показывали выпрямляющий характер и становились омическими после отжига при температуре 720 °С в течении 30 секунд.

Оценка удельного контактного сопротивления проводилась с использованием тестовых ячеек метода длинной линии с прямоугольной конфигурацией контактов.

Результаты измерений удельного контактного сопротивления *исследуемых систем металлизаций* приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений удельного контактного сопротивления контактов, изготовленных различными методами

Технология формирования омического контакта	Металлизация омического контакта, ρ_c , Ом·см ²	Технология формирования омического контакта	Металлизация омического контакта, ρ_c , Ом·см ²
Ионная имплантация непосредственно в полупроводник	Ti/Al/Ni/Au, $6.8 \cdot 10^{-6}$	Ионная имплантация через маску SiO ₂ толщиной 100 нм	Ti/Al/Ni/Au, $7.4 \cdot 10^{-6}$
Ионная имплантация через маску SiO ₂ толщиной 50 нм	Ti/Al/Ni/Au, $2.6 \cdot 10^{-7}$	Ионная имплантация непосредственно в полупроводник	Cr/Pt/Au, $9.1 \cdot 10^{-7}$

Таким образом, исследованы технологии формирования сплавных и несплавных омических контактов к структурам на основе Al-GaN/GaN и проведена оценка удельного контактного сопротивления контактов, изготовленных различными методами.

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

Литература

1. Д.Н. Слаповский, А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, А.В. Клековкин, ФТП, **51**(4), 461 (2017).
2. И.О. Майборода, А.А. Андреев, Письма в ЖТФ, 40(11), 80 (2014).
3. Б.И. Селезнев, Г.Я. Москалев, Д.Г. Федоров, ФТП, **50**(6), 848, 853 (2016).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК HEMT AlGaIn/GaN
СО СПЛАВНЫМИ ОМИЧЕСКИМИ КОНТАКТАМИ НА ОСНОВЕ Si/Al**

**Д.Н. Слаповский¹, А.Ю. Павлов¹, В.Ю. Павлов¹, А.В. Клековкин^{1,2}, М.В. Майтама¹*

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН, 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

**RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF HEMT AlGaIn/GaN
WITH Si/Al BASED OHMIC CONTACTS**

**D.N. Slapovskiy¹, A.Yu. Pavlov¹, V.Yu. Pavlov¹, A.V. Klekovkin^{1,2}, M.V. Maytama¹*

¹V.G. Mokerov Institute 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

For the first time in Russia, the AlGaIn/AlN/GaN HEMT was fabricated with the use of Si/Al/Ti/Au alloyed ohmic contacts formation technology. This technology made it possible to reduce the annealing temperature, 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 controlled. The research of characteristics of the manufactured test HEMTs showed results that are not inferior to the results of transistors with traditional Ti/Al-based ohmic contacts and demonstrated a number of advantages that confirm the relevance of using the alloyed technology.

Ранее в работах [1-2] нами была предложена и исследована новая система сплавных омических контактов Si/Al/Ti/Au для полевых транзисторов на нитридных гетероструктурах. Использование сплавной композиции на основе Si/Al позволило улучшить морфологию омических контактов (рис. 1), обеспечить низкое значение удельного контактного сопротивления, не уступающего значениям, получаемым с использованием традиционных композиций на основе Ti/Al, а также расширить рабочий диапазон температур сплавления. Данная технология является хорошо воспроизводимой, что позволит в дальнейшем внедрить ее в производство СВЧ интегральных микросхем. В рамках данной работы были изготовлены тестовые полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) с использованием сплавной композиции Si/Al/Ti/Au (длина затвора 0.25 мкм) для их исследования и сравнения полученных результатов.

С полученных макетов HEMT AlGaN/AlN/GaN с омическими контактами Si/Al/Ti/Au были сняты статические характеристики. При изготовлении тестовых макетов была выбрана длина затвора, характерная для приборов X-диапазона ($L_g = 0.25$ мкм). Была использована конструкция гетероструктуры с толщиной составного барьерного слоя AlGaN/AlN (14 нм / 0.7 нм), выращенной методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений на подложке SiC. Выходная вольтамперная характеристика представлена на рис. 2.

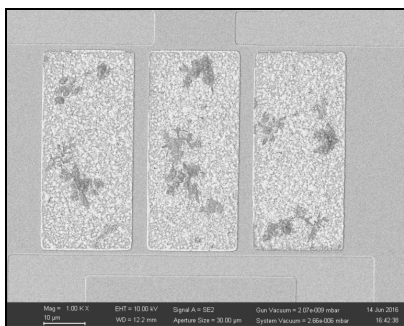


Рис. 1. РЭМ изображения морфологии омических контактов тестового HEMT

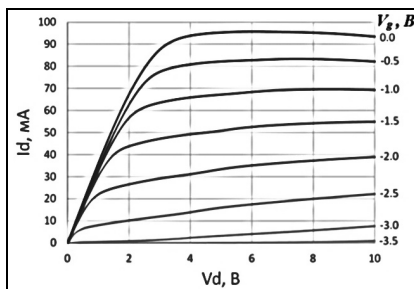


Рис. 2. Выходная ВАХ HEMT AlGaN/GaN со сплавными омическими контактами

Полученные HEMT AlGaN/AlN/GaN имеют удельный ток насыщения при 0 В на затворе 950 мА/мм и удельную крутизну равную 360 мСм/мм. Значение напряжения отсечки составило -3.5 В, а напряжения насыщения 3 В. Измеренное значение удельного контактного сопротивления 0.35 Ом·мм.

Полученные транзисторы по своим характеристикам не уступают транзисторам с аналогичной периферией с традиционными омическими контактами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда поддержки образования и науки имени члена-корреспондента РАН, профессора В.Г. Мокерова.

Литература

1. Д.Н. Слаповский и др., ФТП, 51(4), 461-466 (2017).
2. Д.Н. Слаповский и др., (Сборник трудов 9-ой Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, – М.: НИЯУ МИФИ) 50-51 (2018).

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ И УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР
PHEMT НА СВОЙСТВА КЛЮЧЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

**Д.Ю. Протасов^{1,2}, Д.В. Дмитриев¹, Д.В. Гуляев¹, К.С. Журавлев¹
Г.И. Айзенштат³, А.Ю. Ющенко³*

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;

³АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»,
г. Томск, 634034, ул. Красноармейская, 99а

**THE INFLUENCE OF CONSTRUCTION AND DOPING LEVEL OF PHEMT
HETEROSTRUCTURES ON PROPERTIES OF SWITCH TRANSISTORS**

**D.Yu. Protasov^{1,2}, D.V. Dmitriev¹, D.V. Gulyaev¹, K.S. Zhuravlev¹, G.I. Ayzenshtat³,
A.Yu. Yushchenko³*

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, 63007

³JSC "Research Institute of Semiconductor Devices",
99a, Krasnoarmeiskaya str., Tomsk, 634034

It was shown, that the 2DEG density reached the values $(6\div 7) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ in pHEMT heterostructures at doping level $9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. The maximum conductance was achieved for delta-doped heterostructures with super lattice spacer and doping level $6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. The on-case resistance of transistors fabricated on the $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ PHEMT process is around $1.4 \text{ }\Omega \cdot \text{mm}$ and the parasitic drain-source capacitance is around 0.37 pF/mm .

В современных приемо-передающих модулях широко используются интегральные схемы СВЧ-переключателей, изготовленные на основе гетероструктур pHEMT [1]. К параметрам ключевых транзисторов pHEMT, на которых строятся данные схемы, предъявляется целый ряд требований, главные из которых заключаются в обеспечении минимального сопротивления транзистора в открытом состоянии $R_{\text{он}}$ и минимальной емкости в закрытом состоянии C_{off} . Математическим моделированием было показано [2], что при оптимизации конфигурации гетероструктуры можно с успехом использовать одностороннее легирование.

В данной работе мы приводим результаты изучения зависимости подвижности ДЭГ от концентрации в односторонне легированных pHEMT гетероструктурах вплоть до значений $7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Изменение концентра-

ции электронов в КЯ и в слое параллельной проводимости при увеличении степени легирования проанализировано отдельно с помощью метода спектра подвижности в сочетании с многозонной подгонкой. На основе гетероструктуры с максимальной проводимостью ДЭГ изготовлены макеты ключевых транзисторов и определены их параметры.

Было получено, что при увеличении концентрации легирующей примеси в диапазоне $N_{Si} = 2.8 \cdot 10^{12} \div (5-6) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ концентрация ДЭГ возрастает линейно во всех исследуемых сериях гетероструктурах. При дальнейшем увеличении концентрации примеси от $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ до $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в гетероструктурах с дельта-легированием наблюдается резкое увеличение концентрации ДЭГ. Далее концентрация ДЭГ увеличивается тоже линейно, но с большей скоростью, чем до скачка, причем насыщения концентрации ДЭГ не наблюдается.

На рНЕМТ гетероструктурах с односторонним дельта-легированием была разработана технология монолитных интегральных схем (МИС) с проектной нормой 0,5 мкм. Транзисторы характеризовались следующими параметрами: сопротивление в открытом состоянии 1,4 Ом·мм, емкость в закрытом состоянии 0,37 пФ/мм, напряжение отсечки –1,3 В, максимальная крутизна 400 мСм/мм, ток насыщения 400 мА/мм, напряжение пробоя 10 В. Значение напряжения отсечки регулировалось толщиной барьерного слоя AlGaAs и концентрацией доноров в легированном кремнии δ -слое. рНЕМТ гетероструктуры имели толщину барьерного слоя 25 нм и слоевую концентрацию доноров в δ -слое $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

С использованием указанной технологии были разработаны МИС двухпозиционных переключателей поглощающего типа с ТТЛ-управлением со следующими параметрами: диапазон частот 0–20 ГГц, вносимые потери не более 2,2 дБ, КСВН_{вх/вых} не более 1,7, развязка не менее 40 дБ, верхняя граница линейности по входу при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ не менее 23 дБм, точка пересечения интермодуляционных составляющих третьего порядка по входу не менее 40 дБм.

Литература

1. L. Zhao et al., IEEE Microwave and Wireless Components Lett., (99):1-3 (2017).
2. J.-H. Oh, J.K. Mun, J.-K. Rhee, S.-D. Kim, ETRI J., 31(3) (2009).

**ЭПИТАКСИЯ И СВОЙСТВА МЕТАМОРФНЫХ МНЕМТ ГЕТЕРОСТРУКТУР
С БУФЕРНЫМ СЛОЕМ InAlAs И СОДЕРЖАНИЕМ InAs В КЯ ОТ 20 ДО 100 %**

****А.Н. Виниченко¹, И.С. Васильевский¹, С.С. Пушкарёв², Н.И. Каргин¹***

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

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5

**EPITAXY AND PROPERTIES OF METHAMORPHIC MHEMT
HETEROSTRUCTURES WITH InAlAs BUFFER LAYER AND InAs CONTENT
IN QW FROM 20 TO 100%**

****A.N. Vinichenko¹, I.S. Vasil'evskii¹, S.S. Pushkarev², N.I. Kargin¹***

¹National research nuclear university «MEPhI»,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: ANVinichenko@mephi.ru

²Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics, RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorniy proezd 7/5

The paper considers the influence of the thermodynamic and layer parameters of epitaxial growth on the structural features and electronic transport properties of metamorphic MHEMT nanoheterostructures with an $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ quantum well and $y\text{InAs}$ content in the quantum well from 20 to 100% grown on a basement GaAs (100) and InP (100). The structural quality was analyzed and high electron mobility was obtained for all types of experimentally manufactured epistuctures, the best results were achieved for MHEMT/InP with QW $y\text{InAs} = 100\%$: $20500 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ at room temperature, $128500 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ at 77 K, the two-dimensional electron concentration in this case was $(0.7\text{--}0.8) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Обеспечить прирост дрейфовой скорости насыщения электронов возможно за счет увеличения содержания InAs в канале полевых транзисторов, поэтому наиболее высокочастотные транзисторы и монолитные интегральные схемы реализованы на гетероструктурах (ГС) с высоким содержанием InAs. Одним из подходов является использование ГС с составной квантовой ямой (КЯ) InAlAs/InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs [1]. Другой подход – использование метаморфных наногетероструктур с квантовой ямой InAlAs/In_yGa_{1-y}As/InAlAs с повышенным содержанием у InAs [2]. Однако наиболее близкой к существующим технологиям создания наногетероструктур для полевых транзисторов является метаморфная технология, подразумевающая выращивание метаморфного буфера (достаточно толстого слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ с градиентом состава x) между подложкой и активной областью для обеспечения плавного перехода по параметру решётки и сохранения двумерного роста активных слоёв ГС.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены наногетероструктуры с КЯ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ и с метаморфным буфером $\text{In}_z\text{Al}_{1-z}\text{As}$ на двух типах подложек: GaAs (100) и InP (100). Исследования проведены в диапазоне составов $y\text{InAs}$ от 20 до 100% с шагом $\sim 10\%$. В таблице 1 приведены основные параметры экспериментальных наногетероструктур. Профиль содержания InAs в МБ (z) везде является линейным с использованием инверсной ступени, реализующей обратный градиент состава и снижающей деформационные напряжения перед активной областью ГС.

Таблица 1

Параметры эпитаксиального роста и электронные транспортные свойства экспериментальных образцов

№	$y\text{InAs}, \%$	Подложка	$P_{\text{As4}}, \text{мкТорр}$	$T_g \text{ КЯ}, ^\circ\text{C}$	$\langle \mu_e \rangle, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		$n_s, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	
					300 К	77 К	300 К	77 К
433	20	GaAs	20	455	7490	27500	1.83	1.80
349	37	GaAs	18.5	470	8980	33390	2.52	2.52
504	56	GaAs	14.4	430	10880	34200	1.79	1.69
109	65	GaAs	6.5	460	9640	23100	1.54	1.15
115	75	GaAs	6	450	11670	37730	0.93	0.91
110	85	InP	6.5	460	14280	46320	0.32	0.32
155	90	InP	8	450	13250	93460	0.73	0.75
164	100	InP	7	450	20500	128500	0.83	0.71

При переходе от состава $y = 56\%$ к $y = 65\%$ в КЯ МНЕМТ ГС на подложке GaAs происходит снижение электронной подвижности, связанное с релаксацией буферного слоя, и возникает дополнительное рассеяние электронов в канале на структурных дефектах подложки, поэтому целесообразным для дальнейшего увеличения состава использовать подложку InP, где параметр решетки примерно соответствует $y\text{InAs} = 53\%$.

Все экспериментальные образцы показали высокие значения электронной подвижности и низкие значения шероховатости поверхности ($\sim 1 \div 3$ нм) за счет оптимизации режимов эпитаксиального роста и слоевых параметров наногетероструктур. Максимальную подвижность удалось получить в образце №164 с КЯ из чистого InAs: $20500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при комнатной температуре и $128500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T = 77 \text{ К}$, концентрация квазидвумерного электронного газа при этом составила $(0.7 \div 0.8) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Литература

1. Д.С. Пономарев и др., ФТП 46(4), 500-506 (2012).
2. Е.С. Семенова и др., ФТП 37(9), 1127-1130 (2003).

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В PHEMT
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С СОСТАВНЫМ СПЕЙСЕРНЫМ СЛОЕМ,
СОДЕРЖАЩИМ НАНОСЛОИ AlAs**

**Д.А. Сафонов¹, А.Н. Виниченко¹, Н.И. Каргин¹, И.С. Васильевский¹*

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

**TEMPERATURE DEPENDENCES OF ELECTRON MOBILITY IN PHEMT
HETEROSTRUCTURES WITH COMPOSITE SPACER LAYER WITH AlAs
NANOLAYERS**

**D.A. Safonov¹, A.N. Vinichenko¹, N.I. Kargin¹, I.S. Vasil'evskii¹*

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

A comparison of electronic transport and optical properties of structures with PHEMT pseudomorphic quantum well $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$, $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$, quantum well with AlAs nanoinserts around delta-layer and quantum well with doped AlAs layer is shown in wide temperature range from 2.1 to 300 K. The structures with added AlAs layers exhibit electron concentration decrease combined with increased electron mobility. This effect is related to the suppression of remote ionized impurity electron scattering, change of band structure and decreasing efficiency of silicon atoms doping when incorporating in pure AlAs.

Псевдоморфные PHEMT квантовые ямы (КЯ) $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ на сегодняшний день остаются одними из самых широко используемых гетероструктур в СВЧ электронике. Важной задачей в таких структурах является увеличение подвижности при сохранении высокой концентрации электронов. При модулированном или δ -легировании через спейсеры с ростом концентрации доноров возрастает рассеяние электронов на удаленных ионах примеси. При достаточно большом значении концентрации доноров некоторая часть электронов начинает двигаться уже в области легированного широкозонного барьера [1]. Наличие параллельного проводящего канала приводит к нелинейностям затворных характеристик транзистора [2] и возрастанию шумов [3]. Избежать такого можно с помощью двустороннего легирования или увеличения высоты барьера AlGaAs за счёт большей мольной доли AlAs. Однако при большом (>25%) содержании алюминия в барьере возникают глубокие DX-уровни кремния, которые имеют ограниченную ионизацию и снижают эффективность легирования [4, 5], а толстый широкозонный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$

As в транзисторных НЕМТ структурах может отрицательно сказываться на контактном сопротивлении истока и стока. Тем не менее, при близком расположении донорного слоя к КЯ распределение электростатического потенциала в гетероструктуре может влиять на энергетическое положение донорных уровней, и ионизация даже глубоких уровней может быть достаточно высокой при условии, если они расположены существенно выше уровня Ферми.

Моделирование показывает, что в структурах с гладким барьером AlGaAs волновые функции (ВФ) как основного, так и вышележащих состояний частично проникают в барьер. Введение 2-х тонких барьеров AlAs вокруг δ -слоя Si значительно изменяет вид волновых функций и энергии верхних подзон размерного квантования. При введении нанобарьеров AlAs донорные состояния Si, имеющие в водородоподобном приближении эффективную ширину ВФ порядка 5 нм [6], испытывают сдвиг уровня, аналогичный увеличению средней мольной доли x Al в широкозонном барьере. Влияние барьеров на уровень энергии основного состояния минимально, однако, амплитуда ВФ ψ_1 в области доноров снижается в 4,5 раз во втором образце и в 200 раз в третьем по сравнению с первым. Вышележащие состояния ψ_2 и ψ_3 локализуются преимущественно в отдельных частях структуры – ВФ ψ_2 локализуется преимущественно в КЯ, а ВФ ψ_3 – в области δ -слоя. Сплошной слой 8 нм AlAs значительно увеличивает энергию дна зоны проводимости в области доноров, таким образом, полностью вытесняя электронные состояния из области расположения доноров. В этом случае волновые функции первой и второй подзон становятся практически полностью ограниченными в InGaAs КЯ.

Как показывает эксперимент, структуры с добавлением AlAs демонстрируют повышение электронной подвижности в сочетании с уменьшением концентрации электронов. Эффект связан с подавлением рассеяния электронов на удаленных донорных примесях, изменением зонной структуры и уменьшением эффективности легирования атомов Si при встраивании в чистый AlAs.

Литература

1. I.S. Vasil'evskii, G.B. Galiev et al., Semiconductors, **42**(9) (2008).
2. Y.-W. Chen, W.-C. Hsu, et al., IEEE Trans. Elec. Dev., **49**(2) (2002).
3. J.M. Fernandez, M.E. Lazzouni et al., J. Appl. Phys., **74**(2) (1993).
4. E.F. Schubert, K. Ploog., Phys. Rev. B, **30**(12) (1984).
5. P. Godts, E. Constant et al., Electr. Lett., **24**(15) (1988).
6. G. Bastard (Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures. Les Éditions de Physique) (1988).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АММИАЧНОЙ МЛЭ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ НИТРИДНЫХ НЕМТ ГЕТЕРОСТРУКТУР

**С.И. Петров¹, А.Н. Алексеев¹, В.В. Мамеев¹, С.А. Новиков¹, Е.В. Луценко²,
М.В. Ржеуцкий²*

¹ЗАО «НТО», 194156, г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27, Россия,
e-mail: petrov@semiteq.ru

²Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси,
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-2, Беларусь

HIGH TEMPERATURE AMMONIA MBE TO IMPROVE CRYSTAL QUALITY OF GAN-BASED HEMT HETEROSTRUCTURES

**S.I. Petrov¹, A.N. Alexeev¹, V.V. Mamaev¹, S.A. Novikov¹, E.V. Lutsenko², M.V. Rzhetski²*

¹SemiTEq JSC, 27 Engels Ave., Saint-Petersburg 194156, Russia; e-mail: petrov@semiteq.ru

²Stepanov Institute of Physics of NASB, 68 Nezalezhnasti Ave., Minsk 220072, Belarus

It is shown that the use of high-temperature AlN/AlGaIn buffer layers grown by NH₃-MBE at extremely high temperatures (up to 1200°C) allows one to improve drastically the structural quality of topmost GaN layer. The influence of an ammonia flow in the temperature range 1000–1200 °C was investigated. AlN surface with atomically smooth terraces and RMS below 1 nm has been achieved. This approach along with using Ga as a surfactant during the buffer growth allows one to increase the 2DEG mobility in GaN/AlGaIn up to 2000 cm²/V·s.

Одной из основных проблем при изготовлении приборов на основе III-нитридов является отсутствие недорогих согласованных по параметру решетки подложек. Выращивание на рассогласованных подложках приводит к высокой плотности дислокаций в слоях GaN (10⁹–10¹⁰ см⁻² для МЛЭ, 10⁸–10⁹ см⁻² для МОГФЭ), что усложняет задачу получения приборных гетероструктур. Более высокие значения плотности дислокаций при выращивании МЛЭ связаны с меньшей температурой роста, и соответственно худшей поверхностной подвижностью атомов на ростовой поверхности. Типичные значения подвижности электронов при комнатной температуре в слоях GaN, выращенных на сапфире с использованием буферных слоев находятся в диапазоне 250–350 см² для МЛЭ и 500–700 см² для МОГФЭ.

При этом метод МЛЭ обладает рядом достоинств по сравнению с МОГФЭ, а именно: позволяет контролировать рост на уровне одного монослоя и получать резкие гетерограницы, обеспечивает высокую чистоту камеры роста и материала, предоставляет возможность построения высоковакуумных кластерных систем и др. В настоящее время все большее

число исследователей выбирают МЛЭ с плазменным источником азота, поскольку она более проста в обслуживании, а также обладает рядом особенностей, таких как возможность низкотемпературного роста и отсутствие водорода на ростовой поверхности. Однако в отличие от аммиачной МВЕ данный метод не позволяет заметно увеличить температуру роста и таким образом повысить качество материала.

Ранее были представлены результаты использования обоих разновидностей МЛЭ (с использованием плазменной активации азота и аммиака), полученные на установке STE3N (ЗАО «НТО», SemiTEq). Показано, что выращивание высокотемпературных буферных слоев AlN при экстремально высокой температуре (до 1150 °С) позволяет кардинально улучшить структурное совершенство всей гетероструктуры и слоев GaN в частности. Использование данного подхода вместе со свехрешетками AlGaIn/AlN позволило понизить плотность дислокаций в GaN до значений $9 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, что привело к увеличению подвижности электронов в «объемном» GaN до 600–650 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при концентрации электронов $3 - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Полученные значения плотности дислокаций и подвижности электронов в слоях GaN являются лучшими на сегодняшний день для метода МЛЭ и находятся в числе лучших для метода МОГФЭ. Важно отметить, что получение таких буферных слоев трудно реализовать в плазменной МЛЭ, поскольку для двумерного режима роста AlN необходим Al-обогащенный режим, а десорбция алюминия становится существенной при температуре подложки более 900 °С.

В настоящей работе было детально исследовано влияние потока аммиака в интервале температур подложки 1000–1200 °С. Было установлено, что при оптимизированном потоке аммиака 100 sccm для температуры подложки 1100 °С может быть получена атомарно-гладкая поверхность AlN с террасами и RMS ниже 1 нм. Кроме того, было исследовано влияние Ga как сурфактанта при росте буферного слоя AlN. Определено оптимальное соотношение потоков Al и Ga. Применение данных подходов позволило дополнительно увеличить на 20–30% подвижность электронов в канале GaN/AlGaIn до 2000 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Использование гетероструктур, выращенных с использованием аммиака на подложках SiC в АО «Светлана-РОСТ» позволило достигнуть в СВЧ транзисторах плотность мощности до 9 Вт/мм на 50 В (6,5 Вт/мм на 28 В) и до 5,2 Вт/мм на 28 В на частотах 3 ГГц и 10 ГГц соответственно. Предлагаемые подходы также могут быть применимы для УФ-оптоэлектроники, а также для выращивания темплейтов AlN/Si и технологии получения FBAR фильтров.

**ВИСМУТСОДЕРЖАЩИЕ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ИЗОПЕРИОДНЫЕ БИНАРНЫМ
ПОДЛОЖКАМ АПБВ**

**А.С. Пащенко¹, Л.С. Лунин¹, Д.Л. Алфимова¹, М.Л. Лунина¹, Э.М. Данилина¹,
О.С. Пащенко¹*

¹Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр Российской академии наук
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, дом 41, e-mail: as.pashchenko@gmail.com

**BISMUTHCONTAINING THIN FILMS ISOPERIODIC
TO BINARY SUBSTRATES OF АПБV COMPOUNDS**

**A.S. Pashchenko¹, L.S. Lunin¹, D.L. Alfimova¹, M.L. Lunina¹, E.M. Danilina¹,
O.S. Pashchenko¹*

¹Federal Research Center Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences
Russia, 344006, Rostov-on-Don, Chekhov Avenue, 41, e-mail: as.pashchenko@gmail.com

Heterostructures based on thin films of three-, four-, and five-component III – V solid solutions grown on GaSb, and InSb substrates were investigated. Influence of technological parameters on the structural perfection of thin films was researched. Research of isovalent doping by bismuth on the structural properties and morphology of epitaxially grown films was carried out. It was shown that, in AlInGaBiSb solid solution, bismuth replaces Sb in its sublattice and reduces the probability of the antisite defect creation of $V_{Ga}Ga_{Sb}$ and also reduces the deviation of composition from stoichiometric. On the other side, in thin GaInSbAsP films grown on GaSb substrates, the bismuth introduction (injection) leads to a deterioration in structural perfection. The composition of the source and the solution-melt, the thickness of the liquid zone and the temperature gradient are the main parameters determining the structural perfection and surface morphology of thin films grown on GaSb, and InSb substrates.

Интерес к гетероструктурам на основе многокомпонентных твердых растворов (МТР), выращенных на бинарных подложках АПБV, объясняется их перспективностью с точки зрения создания оптоэлектронных приборов для спектрального диапазона 0.8–5 мкм [1-3]. Использование в гетероструктурах изовалентных компонентов (Sb, Bi, N), активно влияющих на зонную структуру эпитаксиальных слоев в сочетании с различными подложками, открывает широкие возможности в управлении спектром люминесценции, и структурным совершенством. Одним из доступных методов получения тонких пленок на основе МТР продолжает оставаться синтез из жидкой фазы. Целью данной работы является изучение влияния Bi на структурные и оптические свойства тонких пленок, выра-

ценных из жидкой фазы в поле температурного градиента на подложках InSb и GaSb.

Результаты измерений полуширины КДО для гетероструктур $\text{InBi}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{InSb}$, $\text{InBi}_y\text{As}_z\text{Sb}_{1-y-z}/\text{InSb}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Bi}_y\text{As}_z\text{Sb}_{1-y-z}/\text{InSb}$ (рис. 1) показали, что с увеличением G совершенство эпитаксиальных слоев ухудшается и достигает значительных величин уже при $G = 30$ К/см. Это обусловлено тем, что при $G \geq 30$ К/см нарушается стабильность фронта кристаллизации, вследствие чего возникают отклонения от стехиометрического состава из-за несоответствия скоростей кристаллизации и растворения на границах жидкой зоны [2].

Исследование структурного совершенства гетероструктур $\text{GaInSbAsPBi}/\text{GaSb}$ выявило, что полуширина КДО увеличивается с ростом содержания Bi. В зависимости от толщины жидкой зоны при $l < 60$ мкм наблюдается значительное ухудшение качества эпитаксиальных слоев GaInSbAsPBi . Выявлены оптимальные условия роста с высоким структурным совершенством эпитаксиальных пленок AlInGaBiSb на GaSb (рис. 1): $10 \leq G \leq 30$ К/см, $60 \leq l \leq 100$ мкм, и температурный интервал $773 \leq T \leq 873$ К, концентрация висмута 0.3–0.4 ат. доли. Показано, что Bi, замещая в антимониде галлия Sb в его подрешетке, уменьшает образование антиструктурных дефектов V_{GaGaSb} и снижает отклонение состава твердого раствора AlInGaBiSb от стехиометрического [3].

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2019 год (№ 01201354240), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-08-01206.

Литература

1. A. S. Pashchenko et al., Beilstein J. Nanotechnol., **2018**(9), 2794–2801 (2018).
2. D. L. Alfimova et al., Cryst. Rep., **62**(1), 139–143 (2017).
3. D. L. Alfimova et al., Phys. Sol. St., **60** (7), 1280–1286 (2018).

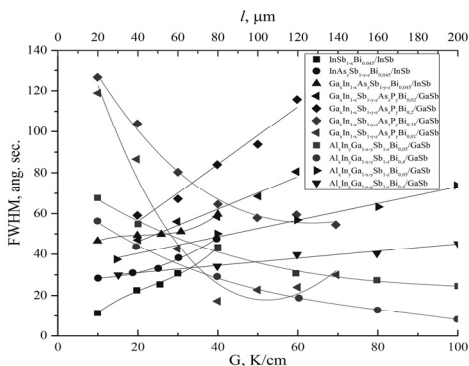


Рис. 1. Зависимость ширины спектра КДО на половине высоты максимума FWHM для гетероструктур $\text{InBi}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{InSb}$, $\text{InBi}_y\text{As}_z\text{Sb}_{1-y-z}/\text{InSb}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Bi}_y\text{As}_z\text{Sb}_{1-y-z}/\text{InSb}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_{1-y-z}\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}/\text{GaSb}$, $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Ga}_{1-x-y}\text{Bi}_y\text{Sb}_{1-z}/\text{GaSb}$ от градиента температуры G , толщины жидкой зоны l и различных концентраций висмута

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
И ГЕРМАНИЕМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПЛЕНОК КРЕМНИЯ**

^{}А.С. Строгова¹, А.А. Ковалевский¹, С.В. Гранько¹, Я.С. Воронец¹*

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

**ALLOYING INFLUENCE BY RARE-EARTH ELEMENTS AND GERMANY
ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE NANOSTRUCTURED SILICON FILMS**

^{}A.S. Strogova¹, A.A. Kovalevskii¹, S.V. Granko¹, Y.S. Voronec¹*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013, Minsk, St. Browki, 6, strogova@bsuir.by

Regularities of alloying by a gas-discharge method and changes of the temperature coefficient of resistance (TCR) of the films of polycrystalline silicon alloyed by rare-earth elements (RZE), a Ge, O₂, B and P from conditions of their formation are investigated. It is established that the quantitative maintenance of RZE, O₂ and the dose of the implanted B and P in volume of a film and also temperature and thermal impact on films, after their deposition, are the fundamental factors having the main impact on the sign and on size TKS. The community and difference in regularities of change of TKS of the films of nanostructure silicon (NSK) which are not alloyed and alloyed by various impurity and various methods are established.

Исследованы закономерности изменения температурного коэффициента сопротивления (ТКС) пленок поликристаллического кремния, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ), Ge, O₂, B и P от условий их формирования. Установлено, что количественное содержание РЗЭ, O₂ и доза имплантированного B и P в объеме пленки, а также термическое воздействие на нее, после их осаждения, являются основополагающими факторами, оказывающими ключевое влияние на знак и на величину ТКС. Установлены общность и различие в закономерностях изменения ТКС нелегированных и легированных различными примесями и различными методами пленок наноструктурированного кремния (НСК), о чем свидетельствуют наши исследования [1].

В результате исследований установлено, что ТКС лантаноидсодержащих пленок НСК с повышением температуры подложки увеличивается в сторону отрицательных значений. Это обусловлено тем, что лантаноиды (РЗЭ) вступают в химическое взаимодействие с целым рядом неметаллических примесей и переводят их в электрически неактивные компоненты. Возможно образование более легких, чем кремний, комплексов,

которые могут уноситься газовым потоком из зоны взаимодействия. В этом случае не исключается возможная очистка пленок НСК от электрически активных примесей. По оценке резисторов серии 1 следует, что малые добавки Eu, Gd и Yb в объем пленки НСК имеют свойство компенсировать положительное значение ТКС резисторов на основе пленок НСК, при чем этот эффект сильнее выражен с Eu. К такому же эффекту приводит легирование пленок НСК иттербием при содержании его в пленках НСК 10^{17} ат·см⁻³. Установлено, что в этой серии самый низкий по абсолютной величине отрицательный ТКС имеют резисторы из пленок НСК, легированных гадолинием. В характеристиках резисторов серии 3 на основе пленок НСК установлено, что пленки НСК, содержащие от 10^{15} до 10^{19} ат·см⁻³ гадолиния, позволяют создать резисторы на основе лантаноидсодержащих пленок НСК с отрицательным ТКС от $2,9 \cdot 10^{-2}$ до $6,2 \cdot 10^{-2}$ К⁻¹. Данные проведенных исследований показаны в таблице.

Серия опытов	Варьируемая характеристика, концентрация примеси в ППКК, ат·см ⁻³	$\Omega, \text{Ом} \times \text{см} \times 10^6$	Отрицательное значение
С 1	$Eu \times 10^{15}$	8	12
	$Gd \times 10^{15}$	4,4	7,4
	$Yb \times 10^{15}$	4,1	6,3
С 2	$Eu \times 10^{17}$	8,4	18,7
	$Gd \times 10^{17}$	6,2	16,15
	$Yb \times 10^{17}$	8	12
С 2	$Eu \times 10^{19}$	2,6	12
	$Gd \times 10^{19}$	2,9	10
	$Yb \times 10^{19}$	1,2	6,5

Расширение диапазона сопротивлений резисторов с отрицательным значением величины ТКС требует дополнительного модифицирования. Однако для его реализации необходимо объяснить механизм влияния РЗЭ на ТКС пленок НСК и резисторов на их основе. Характеристики резисторов серии 3 на основе пленок НСК (табл. 1) показывают, что пленки НСК, содержащие 10^{19} ат·см⁻³ гадолиния, позволяют изготавливать резисторы на основе пленок НСК с отрицательным ТКС $2,9 \cdot 10^{-2}$ К⁻¹.

Литература

1. А.С. Строгова и др., (Получение и свойства тонких пленок с кремниевыми, германиевыми и кремний-германиевыми наноструктурами, –Минск: Бестпринт), 222 с. (2018).

ВЛИЯНИЕ БУФЕРНОГО СЛОЯ AlN НА ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ GaN НА ГРАФЕНЕ

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

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: DPBorisenko@mephi.ru

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

EFFECT OF AN AlN BUFFER LAYER ON THE EPITAXIAL GROWTH OF GaN ON GRAPHENE

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

¹National Research Nuclear University «MEPhI»,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: DPBorisenko@mephi.ru

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

The possibility of CVD graphene using as a 2D buffer layer for epitaxial growth of III-nitrides by PA-MBE on amorphous substrates (SiO₂ prepared by thermal oxidation of Si wafer) was investigated. It was shown that epitaxial GaN films with close to 2D surface morphology can be obtained by PA-MBE on amorphous SiO₂ substrates with multilayer graphene buffer using the HT AlN nucleation layer. The effect of an AlN buffer layer on the epitaxial growth of GaN by PA-MBE is studied. The comparative study of the wafers was carried out by scanning electron microscopy and X-ray diffractometry.

В данной работе мы исследовали рост буферного AlN NL и его влияние на структуру плёнок GaN на пластинах Graphene/SiO₂/Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией азота.

Эпитаксиальные слои GaN и AlN выращивались с помощью PA-MBE с использованием установки Veeco GEN 930, оснащенной азотно-плазменным активатором UNI-Bulb Veeco RF. Были получены плёнки GaN на поверхности Graphene/SiO₂/Si с использованием буферного Al NL и без него. Рост слоев GaN начинался с зарождения высокотемпературного слоя AlN толщиной 20–30 нм при $T_s = 710^\circ\text{C}$ в режиме, обогащенном азотом ($F_{\text{Al}}/F_{\text{N}} \approx 0,6$). После этого слой GaN толщиной 500 нм выращивали в обогащённых металлом условиях ($F_{\text{Me}}/F_{\text{N}} > 1,5$) при той же температуре подложки. Зародышеобразование и рост плёнки контролировали *in situ* методом высокоэнергетической дифракции электронов (RHEED). Экспериментальные образцы исследовались с помощью растрового элек-

тронного микроскопа LYRA3 SEM (TESCAN) и рентгеновского дифрактометра Ultima IV (Rigaku).

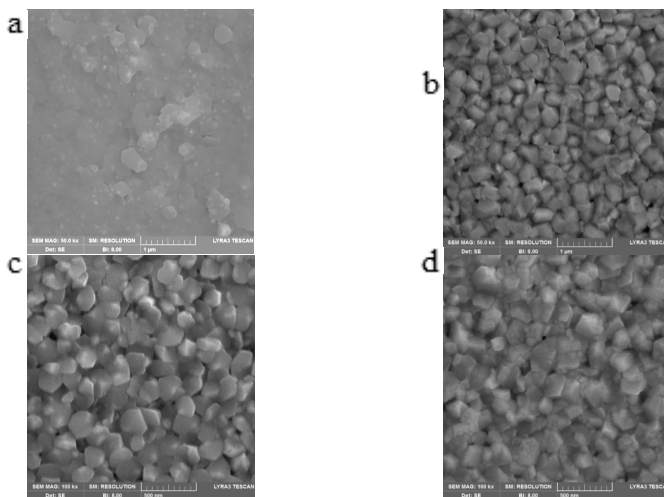


Рис. 1. Изображения с растрового электронного микроскопа LYRA3 SEM (TESCAN)

На рис. 1 приведены типичные РЭМ изображения поверхности плёнки GaN: а и б относятся к поверхности образца с использованием AlN NL, для участков с графеном и без него, с и d – поверхность образца без использования AlN NL, для участков с графеном и без него соответственно. Как показано на рис. 1 (а), при росте на участках, покрытых слоем графена с использованием AlN NL, пленка GaN имеет близкую к 2D морфологию поверхности с переходом к относительно крупным зернам гексагональной формы (размером 200-300 нм) в дефектных местах, что указывает на ориентированный эпитаксиальный рост. Плёнки GaN, выращенные без использования AlN NL, характеризуются зернистой структурой, характерной для поликристалла, что подтверждается изображением RHEED в процессе роста и спектрами рентгеновской дифракции.

Полученные результаты указывают, что использование буферного AlN NL на подложках Graphene/SiO₂/Si может привести к улучшению структурных и электрических свойств получаемых плёнок GaN.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРНОГО СЛОЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ЭПИТАКСИАЛЬНОМ ГРАФЕНЕ НА КАРБИДЕ
КРЕМНИЯ**

****А.В. Аврамчук², М.М. Михалик², И.В. Комиссаров^{1,2}, Н.И. Каргин¹, В.А. Лабунюв^{1,2}***

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, e-mail: komissarov@bsuir.by

**THE EFFECT OF POLYMER LAYER ON THE CHARGE CARRIER
CONCENTRATION IN EPITAXIAL GRAPHENE ON SILICON CARBIDE**

****A.V. Avramchuk², M.M. Mikhalik², I.V. Komissarov^{1,2}, N.I. Kargin¹, V.A. Labunov^{1,2}***

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, e-mail: komissarov@bsuir.by

In this work, we present the effect of polymer layer (S1813 photoresist) processing on the electronic properties of epitaxial graphene on SiC. We observed by Hall and Raman spectroscopy techniques the decreasing of charge carrier concentration (holes) after deposition and removing polymer layer. Moreover, our XPS study shows vanishing of lines with binding energies 533.8 eV and 289.2 eV after such processing.

Высокая подвижность носителей заряда в совокупности с его размерностью, определяет перспективность графена для его использования в различных приложениях электроники. Одной из проблем, с которой сталкиваются технологи при разработке приборов на основе графена, является критическая зависимость электрофизических характеристик графена (концентрация носителей заряда, их тип и подвижность) от степени его загрязнения, на пример адсорбированными молекулами различных органических и неорганических соединений в ходе процессов литографии.

Целью данной работы было исследовать влияние процесса нанесения и удаления фоторезиста S1813 на электронное состояние графена. В работе использовались образцы коммерческого эпитаксиального графена, выращенного на подложке карбида кремния 4H-SiC(0001). Фоторезист наносился стандартным методом центрифугирования, с последующей просушкой и удалением в растворах демитилформамида и ацетона. Анализ состояния образцов проводился методами РФЭС, рамановской спек-

троскопии, а также были проведены измерения электротранспортных характеристик методом Холла.

На рис. 1 представлены данные РФЭС для C1s и O1s пиков образцов графена до (а, в) и после (б, г) процесса нанесения и удаления полимера. Установлено, что атомные концентрации кислорода, определенные по интегральным интенсивностям линий O1s, для образцов, на которых был нанесен и удален полимер, ниже, чем на исходных образцах и составляли 4.0-4.7 и 7.8-8.5 ат. %, соответственно. Кроме этого, выявлено, что в случае образцов подвергшихся процессу нанесения и удаления полимера интенсивность линий, соответствующих энергиям связи 533.8 эВ и 289.2 эВ, практически равна нулю, что позволяет заключить об удалении алифатических групп поверхности образцов. В это же время анализ пленок методом рамановской спектроскопии и электротранспортные измерения показывают уменьшение концентрации дырок в исследуемых образцах графена.

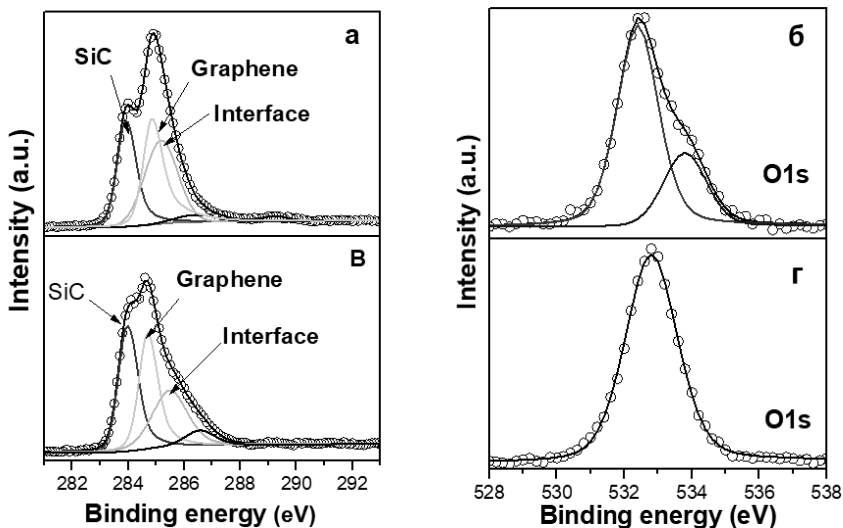


Рис. 1. Спектры C1s и O1s образцов графена до (а, в) и после процесса нанесения и удаления полимера (б, г)

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СВЕРХТОНКИХ СЛОЕВ ИНТЕРКАЛИРОВАННОГО ГЕРМАНЕНА

^{*}*Д.В. Аверьянов¹, И.С. Соколов¹, А.М. Токмачёв¹, И.А. Каратеев¹, А.Н. Талденков¹,
О.Е. Парфёнов¹, С.А. Тихомиров¹, В.Г. Сторчак¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1, e-mail: dm_averyanov@mail.ru

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF ULTRATHIN LAYERS OF INTERCALATED GERMANENE

^{*}*D.V. Averyanov¹, I.S. Sokolov¹, A.M. Tokmachev¹, I.A. Karateev¹, A.N. Taldenkov¹,
O.E. Parfenov¹, S.A. Tikhomirov¹, V.G. Storchak¹*

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”

Russia, 123182, Moscow, Kurchatov Sq. 1, e-mail: dm_averyanov@mai.ru

Last decades have witnessed a momentous progress in spintronics, owing much to extensive research in magnetic thin films and interfaces. However, the demand for ultra-compact spintronics pushes magnetic materials to the 2D limit. Recently discovered by our group 2D ferromagnets EuSi_2 and GdSi_2 with a structure of silicene intercalated by magnetic ions [1, 2] can be considered as the nucleus of a new promising class of 2D magnetic materials.

Here we present studies of isostructural polymorphs of GdGe_2 and EuGe_2 , MBE-grown on $\text{Ge}(111)$. The excellent crystalline quality of the films is established with RHEED, XRD and TEM. SQUID-measurements reveal that ultrathin films become ferromagnetic in contrast to thick antiferromagnetic samples. The emerging ferromagnetism shows its genuine 2D nature, manifesting dramatic variation of T_C as a function of low magnetic fields. Transport measurements support these results, demonstrating negative magnetoresistance in ultrathin layers as well as the anomalous Hall effect typical for ferromagnets.

В последние десятилетия в области спинтроники наблюдается значительный прогресс, достигнутый во многом благодаря исследованию магнитных тонких пленок и интерфейсов. Вместе с тем, необходимость реализации сверхкомпактных спинтронных устройств заставляет сконцентрировать внимание на двумерных магнитных материалах. Дальний магнитный порядок, как правило, подавляемый в двумерных магнетиках тепловыми флуктуациями, в ряде случаев может поддерживаться благодаря магнитной анизотропии и дальним взаимодействиям, и публикации о магнетизме в двумерных слоистых системах начинают появляться [3].

Вместе с тем, не прекращается поиск новых материалов, проявляющих подобные свойства. Недавно открытые нашей группой двумерные ферромагнетики (ФМ) EuSi_2 и GdSi_2 со структурой интеркалированного

магнитными ионами силицена [1, 2] можно рассматривать в качестве первого представителя нового весьма привлекательного класса 2D магнитных материалов. В данной работе приводятся результаты исследования сверхтонких пленок GdGe_2 и EuGe_2 , являющихся логическим развитием этого класса в аспекте кристаллической структуры: силиценовые слои в данных соединениях заменены на германеновые.

Синтез образцов производился методом молекулярно-лучевой эпитаксии путем осаждения Gd или Eu на подложку Ge(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 оказываются достаточно выраженными для их измерения с помощью СКВИД-магнитометра. Объемные пленки демонстрируют типичный антиферромагнитный переход. Однако при уменьшении толщины температурные зависимости намагниченности радикально 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 ФМ.

Фундаментальное изменение магнитного состояния отражается и на транспортных свойствах. В отличие от толстых образцов, демонстрирующих положительное магнетосопротивление, сверхтонкие пленки показывают отрицательное магнетосопротивление, что является признаком ферромагнитного состояния. Наблюдающийся в них аномальный эффект Холла также имеет вид, характерный для ФМ.

Представленная работа проведена при частичной поддержке НИЦ «Курчатовский институт», РФФИ (гранты 16-29-03027 и 17-07-00170 и 19-07-00249).

Литература

1. A.M. Tokmachev et al., Adv. Funct. Mater. **27**, 1606603 (2017).
2. A.M. Tokmachev et al., Nat. Commun. **9**, 1672 (2018).
3. C. Gong and X. Zhang, Science **363**, 706 (2019).

СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА И ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ЕГО ОСНОВЕ

**Е.Б. Чубенко¹, А.В. Баглов¹, Е.С. Лисимова¹, В.Е. Борисенко^{1,2}*

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

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

SYNTHESIS AND LUMINESCENT PROPERTIES OF GRAPHITIC CARBON NITRIDE AND RELATED HETEROSTRUCTURES

**E.B. Chubenko¹, A.V. Baglov¹, E.S. Lisimova¹, V.E. Borisenko^{1,2}*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013, Minsk, P. Browka 6, e-mail: eugene.chubenko@gmail.com

²National Research Nuclear University MEPHI
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe Av. 31

Graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) is a semiconductor material with unique combination of properties. Recently $g\text{-C}_3\text{N}_4$ has attracted great interest of scientific society due to its high photocatalytic activity, effective photoluminescence, durability and simple fabrication process. We have studied the synthesis of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ by thermal polymerization of melamine precursor at different temperatures in an oxygen containing atmosphere to achieve *in situ* oxygen doping. We observed that oxygen concentration in the fabricated $g\text{-C}_3\text{N}_4$ powders increases from 2.9 to 4.6 at.% within the synthesis temperature range of 450–600 °C. Simultaneously, the photoluminescence peak shifts from 424 to 473 nm. We suppose that this red-shift of the photoluminescence band is caused by band-gap narrowing with the increase of the oxygen doping concentration. Heterostructures based on $g\text{-C}_3\text{N}_4$ synthesized in macroporous silicon or porous SiO_2 substrates were found to exhibit the same behavior.

В сфере развития энергетики и электроники для обеспечения устойчивого роста отрасли в настоящее время ключевым является вопрос обеспечения ресурсной и энергетической безопасности [1]. Ограниченный доступ к ряду необходимых ресурсов в условиях постоянно расширяющегося рынка потребления электроники в промышленности, энергетике и быту приводит к необходимости поиска и разработки технологии получения альтернативных материалов, синтезируемых недорогими методами и не включающих элементы, являющиеся стратегическими ресурсами, или требующих сложной пост-обработки для модификации свойств. Одним из таких материалов является графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) – полимерный полупроводник, обладающий высокой

химической стойкостью и стабильностью [1, 2]. В настоящее время $g\text{-C}_3\text{N}_4$ привлекает внимание благодаря простоте получения и уникальным фотокаталитическим и люминесцентным свойствам. Обычно для синтеза $g\text{-C}_3\text{N}_4$ используется метод пиролитического разложения с последующей полимеризацией продуктов органических азотосодержащих прекурсоров, таких как меламин, тиомочевина, дицианоамид и др. [2]. Независимо от используемого прекурсора свойства $g\text{-C}_3\text{N}_4$ могут изменяться при вариации параметров процесса синтеза [3, 4].

Мы исследовали закономерности изменения фотолюминесцентных свойств $g\text{-C}_3\text{N}_4$, синтезированного термообработкой меламина при 450 – 600 °С. Синтез проводился в замкнутом объеме кислородосодержащей атмосферы в пустом тигле для получения порошка $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и на подложках из макропористого кремния и пористого оксида кремния. Полученные порошки $g\text{-C}_3\text{N}_4$ имеют пространственную слоистую структуру. Концентрация кислорода увеличивается с ростом температуры с 2,9 ат.% при 450 °С до 4,6 ат.% при 600 °С. Положение максимума интенсивности фотолюминесценции линейно смещается в длинноволновую область при увеличении температуры синтеза (рис. 1). Это смещение обусловлено

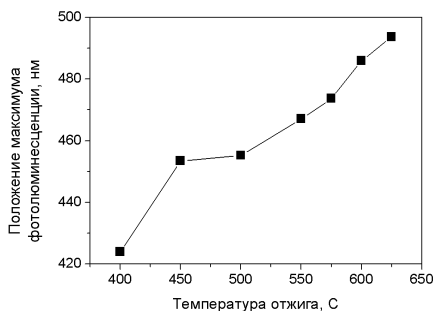


Рис. 1. Зависимость положения максимума фотолюминесценции $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в зависимости от температуры синтеза

уменьшением ширины запрещенной зоны полупроводника с увеличением концентрации кислорода. Гетероструктуры из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ на подложках из макропористого кремния и пористого оксида кремния показывают аналогичные закономерности.

Работа выполнена в рамках заданий ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» 1.56, «Фотоника, опто- и микроэлектроника»

2.1.02 и гранта Министерства образования Республики Беларусь для докторантов.

Литература

1. F.K. Kessler et al., Nat. Rev. Mater., **2**, 17030 (2017).
2. A. Sudhaik et al., J. Ind. Eng. Chem., **67**, 28 (2018).
3. G. Zhang et al., J. Mater. Chem., **22**, 8083 (2012).
4. N.M. Denisov et al., Tech. Phys Lett., **45**, 108 (2019).

МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ УНТ

**С.Л. Прищепа^{1,2}, А.Л. Данилюк¹, И.В. Комиссаров^{1,2}*

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

MAGNETIC RELAXATION IN CNT-BASED NANOCOMPOSITES

**S.L. Prischepa^{1,2}, A.L. Danilyuk¹, I.V. Komissarov^{1,2}*

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

The relaxation of the magnetic moments in a CNT – based nanocomposite synthesized CVD is studied. The material consists on a matrix of CNT filled by Fe – based nanoparticles. The results obtained from both M(H) and ZFC-FC measurements confirm that the material is characterized by both a strong ferromagnetic exchange and random magnetic anisotropy. For the first time we have been able to fit the magnetic relaxation data, M(t), by using both the two distributions of nanoparticles data deduced from the ZFC-FC data and the temperature dependence of the magnetic anisotropy obtained from the law of approach to saturation in random magnets. This analysis is fully self-consistent and explain very well the data.

В настоящее время активно исследуются свойства новых нанокomпозитов, в которых магнитные наночастицы внедрены в матрицу другого материала. Варьируя различные параметры как наночастиц, так и так и матрицы, можно получить новые функциональные свойства [1]. В данной работе мы исследуем релаксацию магнитных моментов и характер межчастичного взаимодействия в нанокomпозите, представляющим собой УНТ в качестве матрицы и наночастиц цементита Fe₃C в качестве ферромагнетика. Размер наночастиц определялся диаметром УНТ и не превышал 30-50 нм. Образцы получались методом химического парового осаждения [2].

Установлено, что локальные магнитные моменты наночастиц ориентированы случайным образом и между ними преобладает обменное взаимодействие. Корреляция осей магнитной анизотропии является короткодействующей. Корреляционная функция осей магнитной анизотропии в реальном пространстве представляет собой слабо осциллирующую зависимость с быстрым спаданием на величине порядка диаметра наноча-

стиц [3]. Эти данные были получены из анализа магнитостатических характеристик, полученных в интервале температур 4–300 К. Кроме того, были выявлены метастабильные состояния, приводящие к особенностям температурного поведения намагниченности. Все эти процессы сказались на температурной зависимости магнитной вязкости, полученной из магнето релаксационных измерений.

На рис. 1 точками показана полученная температурная зависимость магнитной вязкости $S(T)$. Из этих данных следует, что зависимость $S(T)$ не линейна, как и должно быть при наличии метастабильных магнитных состояний. Полученный результат анализировалась в рамках модели медленной релаксации [4]. Было установлено, что функция распределения наночастиц по объёму может быть представлена в виде:

$$f(V) \sim V^{-1} \exp\{-\varphi(T)[V/V_0]\},$$

где $\varphi(T)$ – пробная функция, зависящая только от температуры, $V_0 = kT_B \ln(t/t_0)/K_B$, K_B – постоянная анизотропии при температуре блокировки T_B . На рис. 1 показана пробная функция (штрихпунктирная линия) и результат подгонки экспериментальных данных с её учётом (сплошная линия). Видно хорошее согласие с экспериментом. Полученная функция распределения $f(V)$ показана на рис. 2 для разных температур и $V < V_0$, т.е. для $T < T_B$. Видно, что функция распределения практически не зависит от температуры.

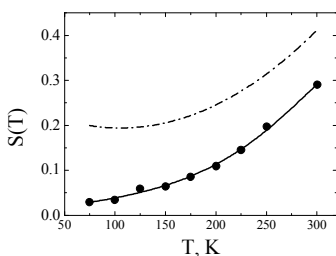


Рис. 1. Зависимость магнитной вязкости от температуры

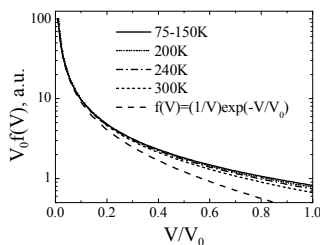


Рис. 2. Функция распределения $f(V)$ при разных температурах

Литература

1. D. Xiao et al., Microchim. Acta, **183**, 2655 (2016).
2. A.L. Danilyuk et al., Carbon, **68**, 337 (2014).
3. A.L. Danilyuk et al., New J. Phys., **17**, 023073 (2015).
4. J. Tejada et al., Phys. Rev. B, **47**, 14997 (1993).

**ОБМЕННОЕ МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В МОНОСЛОЯХ
 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ И $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$**

****М.С. Баранова¹, В.Р. Стемпницкий¹***

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, Петруся Бровки, 6, e-mail: baranova@bsuir.by

**EXCHANGE MAGNETIC INTERACTION
OF $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ AND $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ MONOLAYERS**

****M.S. Baranova¹, V.R. Stempitski¹***

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronic
Republic of Belarus, Minsk, 220013, P. Brovki str. 6, e-mail: baranova@bsuir.by

The exchange interaction integrals have been observed through magnetic, structural and electronic properties of $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ and $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ first-principles simulation in the VASP software package and Heisenberg model approach. The structural parameters for the bulk layered $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ and $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ were determined and in good agreement with the experiment. Exchange interaction integrals between the first, second and third neighbors have been calculated for monolayers. The exchange integral with the first neighbors J_1 was -2.34 ($\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$) and -1.61 ($\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$) meV. Thus, strong ferromagnetic order exists in plane of monolayers of $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$, $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ and magnetic anisotropy leads to long-range ferromagnetism.

Возможность формирования ферромагнитного порядка в двумерных материалах типа MAX_3 ($M = \text{Mn, Ni, V, Cr, Fe, A} = \text{Si, Ge, X} = \text{Se, Te}$) открывает новые перспективы в области нанoeлектроники. [1–3].

В настоящей работе представлены результаты изучения магнитных свойств двумерных $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ и $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$, в плоскости которых может наблюдаться собственный ферромагнетизм.

Обменное взаимодействие играет ключевую роль при формировании магнитного порядка в материалах. Расчет интеграла обменного взаимодействия возможен с помощью квантово-механического моделирования основного состояния системы с различными положениями проекции спина магнитных атомов и применения модели Гейзенберга [4]. Допуская, что в $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ и $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ весь магнитный момент локализован на атомах хрома, для расчета обменного интеграла между магнитным атомом и тремя ближайшими соседями понадобились четыре систем с различными спиновыми конфигурациями, из них одна обладала ферромагнитным порядком и три других антиферромагнитным.

Расчет основного энергетического состояния систем выполнялся в программном комплексе VASP (Vienna *Ab-initio* Simulation Package) [5]. Слой вакуумной прослойки в суперячейке составлял 15 Å вдоль кристаллографического направления z . Энергия обрезания составляла 440 эВ, сетка k -точек $4 \times 4 \times 1$ Гамма центрированная. Конфигурация валентных электронов Cr, Ge, Si и Te $[\text{Ar}]3d^5 4s^1$, $[\text{Ar}]3d^{10} 4s^2 4p^2$, $[\text{Ne}]3s^2 3p^2$ и $[\text{Kr}]4d^{10} 5s^2 5p^4$, соответственно.

Для элементарных ячеек $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ и $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ выполнена структурная релаксация. Используя оптимизированные структурные параметры сгенерированы четыре суперячейки, которые позволяют провести квантовомеханическое моделирование для необходимых спиновых конфигураций. На основе полученных результатов моделирования вычислены интегралы обменного взаимодействия. Для монослоя $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ значения обменного интеграла составили -2.34 мэВ между атомом хрома и первым одноименным соседним атомом, а также $-2.89 \cdot 10^{-6}$ мэВ и 0.14 мэВ между вторым и третьим соседними атомами соответственно, для $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ -1.61 мэВ, 0.01 мэВ, -0.20 мэВ для первого, второго и третьего соседнего атома соответственно.

Полученные значения интеграла обменного взаимодействия позволяют сделать вывод о формировании сильного ферромагнитного порядка в плоскости монослоев $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ и $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$. Эффективный магнитный момент атома хрома составил $3.14 \mu_B$. Сильная гибридизация p -состояний халькогена и d -состояний переходного металла может говорить о возможном суперобменном механизме формирования дальнего магнитного порядка.

Литература

1. T.J. Williams, A. A. Aczel, M. D. Lumsden, S. E. Nagler, M.B. Stone, J.-Q. Yan, D. Mandrus, Phys. Rev. B, **92**, 144404 (2015).
2. Y. Sun, R.C. Xiao, G.T. Lin R.R. Zhang, L.S. Ling, Z.W. Ma, X. Luo, W.J. Lu, Y.P. Sun, Z.G. Sheng, K. Elissa, Effects of hydrostatic pressure on spin-lattice coupling in two-dimensional ferromagnetic $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ "Title of paper if known", unpublished.
3. Cheng Gong, Lin Li, Zhenglu Li, Huiwen Ji, Alex Stern, Yang Xia, Ting Cao, Wei Bao, Chenzhe Wang, Yuan Wang, ZQ Qiu, RJ Cava, Steven G. Louie, Jing Xia & Xiang Zhang, Nature, **546**, 265-269 (2017).
4. B. Siberchicot, S. Jobic, V. Carteaux, P. Gressier and G. Ouvrard, J. Phys. Chem., **100**, 5863, (1996).
5. I. Solovyev, M. Valentyuk, V. V. Mazurenko, Phys. Rev. B, **86**, 144406 (2012).

МАГНЕТИЗМ ИНТЕРКАЛИРОВАННОГО ГРАФЕНА И ПОВЕРХНОСТНЫХ ФАЗ

^{}И.С. Соколов¹, Д.В. Аверьянов¹, И.А. Каратеев¹, А.М. Токмачёв¹, О.Е. Парфёнов¹,
А.Н. Талденков¹, В.Г. Сторчак¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1,

e-mail: sokolov.ivan.qed@gmail.com

MAGNETISM OF INTERCALATED GRAPHENE AND SURFACE PHASES

^{}I.S. Sokolov¹, D.V. Averyanov¹, I.A. Karateev¹, A.M. Tokmachev¹, O.E. Parfenov¹,
A.N. Taldenkov¹, V.G. Storchak¹*

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”

Kurchatov Sq. 1, 123182 Moscow, Russia, e-mail: sokolov.ivan.qed@gmail.com

Two-dimensional magnetic systems hold the promise of high-density spintronic devices with low power consumption. Special attention is paid to incorporation of magnetism into the archetypical 2D material graphene. Here we study europium intercalated bilayer graphene as well as surface phases of metals on single layer graphene, produced with molecular beam epitaxy. The atomic structure of the samples is controlled *in situ* with electron diffraction and *ex situ* with cross-sectional electron microscopy. Magnetization measurements are carried out with SQUID magnetometry and XMCD at the Eu L₃-edge. Eu-intercalated graphene and its surface phase $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ reveal ferromagnetic behavior in a wide temperature range. The observed high carrier mobility is an evidence of transport via graphene states.

Исследования двумерных материалов с носителями дираковского типа являются одним из приоритетных направлений в физике твердого тела, что обусловлено как особенностями их электронной структуры, так и широким спектром свойств и возможных применений. Двумерные магнитные материалы перспективны для создания ультра-компактной спиновой электроники. В настоящее время активно исследуются возможности как создания 2D материалов с собственным магнетизмом [1, 2], так и внедрения магнетизма в немагнитные материалы, графен в особенности, за счет инжиниринга дефектов и краев, эффектов близости [3]. В последнем направлении значительный прогресс достигнут при использовании Eu-содержащих соединений [4, 5].

В данной работе представлены результаты исследований 2 типов структур: (i) интеркалированного атомами европия двуслойного графена (BLG), (ii) поверхностных фаз металлов на однослойном графене (SLG). Исследования проводились, опираясь на результаты известных теорети-

ческих работ, предсказывающих получение магнитных состояний в графене за счет эффекта близости с магнитными моментами.

Набор структур получен методом молекулярно-лучевой эпитаксии путем осаждения на однослойный графен атомов металлов (Eu, Gd, Sr) и Eu на двуслойный графен. Графен (SLG и BLG) был предварительно перенесен на пластины кремния и диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. Процесс синтеза контролировался в ростовой камере с помощью дифракции быстрых электронов. Дальнейшее исследование атомной структуры проводилось *ex situ* с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Измерения магнитных свойств поверхностных фаз металлов на SLG интегральным методом СКВИД-магнитометрии выявили ферромагнетизм только в образце с поверхностной фазой Eu $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, соответствующей степени покрытия в 1/6 монослоя. Результат подтвержден элемент-селективными данными, полученными в результате измерений XMCD сигнала с образца на L_3 -крае Eu (край поглощения соответствовал Eu(II)).

Образцы Eu-интеркалированного BLG также демонстрируют ферромагнитное поведение: магнитный переход наблюдается при температурах близких к 70 К, низкотемпературные полевые зависимости показывают насыщение в полях $\sim 10^3$ Э. Интересно влияние интеркалированного Eu на транспортные свойства BLG. Зависимость холловского сопротивления $R_{xy}(B)$ нелинейна с гистерезисом, исчезающим при температуре около 50 К. Результаты свидетельствуют о спин-поляризованной природе носителей, что открывает возможности создания элементов спинтроники на основе двумерных материалов с магнитными свойствами.

Представленная работа проведена при частичной поддержке НИЦ «Курчатовский институт» и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-07-00204, 17-07-00170 и 19-07-00249).

Литература

1. K.S. Burch, D. Mandrus, J.-G. Park, *Nature*, **563**, 47-52 (2018).
2. C. Gong, X. Zhang, *Science* **363**, eaav4450 (2019).
3. J. Tuček et al., *Chem. Soc. Rev.*, **47**, 3899-3990 (2018).
4. P. Wei et al., *Nat. Mater.*, **15**, 711-716 (2016).
5. D.V. Averyanov et al., *ACS Appl. Mater. Interf.*, **10**, 20767-20774 (2018).

СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК GdGe_2

^{}И.А. Каратеев¹, И.С. Соколов¹, Д.В. Аверьянов¹, А.Н. Талденков¹, А.М. Токмачёв¹,
О.Е. Парфёнов¹, В.Г. Сторчак¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1, e-mail: iakarateev@gmail.com

STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF GdGe_2 THIN FILMS

^{}I.A. Karateev¹, I.S. Sokolov¹, D.V. Averyanov¹, A.N. Taldenkov¹, A.M. Tokmachev¹,
O.E. Parfenov¹, V.G. Storchak¹*

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”

Kurchatov Sq. 1, Moscow, 123182 Russia, e-mail: iakarateev@gmail.com

Traditional spintronics explores magnetic properties of thin films and interfaces. However, the appeal of ultra-compact spintronics shifts interest to low-dimensional magnetic materials. Recently, we discovered transformation from 3D antiferromagnetism to 2D ferromagnetism in the rare-earth compounds EuSi_2 and GdSi_2 with the layered structure of silicene sheets intercalated by magnetic ions [1]. Here, we present studies of GdGe_2 films grown with MBE on $\text{Ge}(111)$, isostructural to GdSi_2 . TEM studies demonstrate vacancy ordering in the Ge layers in films grown at high temperature. SQUID-measurements reveal a structure/property relationship: only films with ordered vacancies exhibit pronounced magnetic properties.

Традиционно, основным направлением спинтроники было исследование тонких магнитных пленок и интерфейсов. В настоящее время стремление уменьшить размеры устройств сместило интерес в область низкоразмерных магнитных материалов. Дальний магнитный порядок в данном случае может поддерживаться магнитной анизотропией и дальним взаимодействием.

Ранее нам удалось продемонстрировать размерно-зависимый магнетизм в редкоземельных силицидах EuSi_2 и GdSi_2 [1]. Структура этих материалов представляет собой слои силицена, интеркалированного магнитными ионами. В данной работе приводятся результаты исследования структуры и магнитных свойств аналогичного соединения на основе германия GdGe_2 .

Синтез образцов производился методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Атомы Gd осаждались на подложку $\text{Ge}(111)$, она же обеспечивала поток атомов Ge за счет процессов диффузии. Структура пленок контролировалась как во время роста, с помощью дифракции быстрых электронов, так и после роста, с помощью просвечивающей электронной микро-

скопии. Оба метода показали, что в результате роста формируется пленка GdGe_2 без дополнительных фаз и с резкой границей подложка/пленка. С увеличением толщины пленки наблюдается колонковый рост, и верхний интерфейс огрубляется.

Аналогично GdSi_2 , в GdGe_2 присутствуют вакансии в германиевых слоях. Установлено, что с ростом температуры подложки наблюдается упорядочение этих вакансий. Последнее продемонстрировано несколькими способами (рис. 1): прямым наблюдением решетки GdGe_2 в режиме темнопольной просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ), показывающим меньшую интенсивность в некоторых Ge колонках, а также с помощью электронной дифракции, выявляющей дополнительные, сверхструктурные рефлексy от пленки.

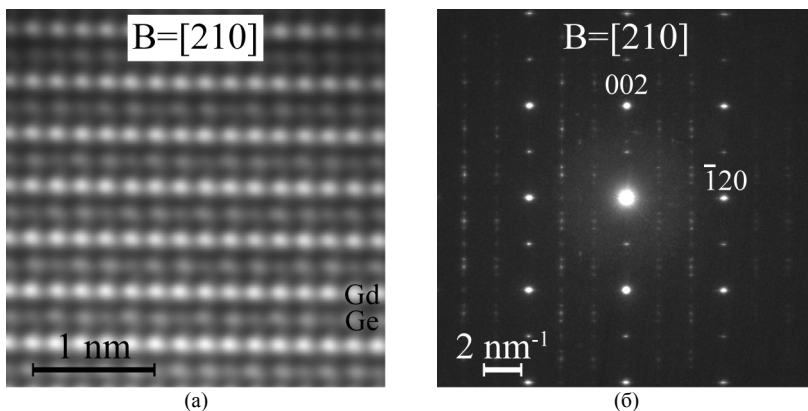


Рис. 1. (а) Темнопольное ПРЭМ изображение структуры GdGe_2 в оси зоны $B=[210]$; видны вакансии в Ge-слоях. (б) Картина электронной дифракции от пленки; видны сверхструктурные рефлексy, говорящие об упорядочении вакансий

Магнитные свойства образцов измерены с помощью СКВИД-магнетометра. Антиферромагнитное поведение демонстрируют только образцы, в которых вакансии упорядочены. Тем самым выявлена прямая связь между структурой пленки и ее магнетизмом.

Представленная работа проведена при частичной поддержке НИЦ «Курчатовский институт» и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты 16-29-03027, 17-07-00170 и 19-07-00249).

Литература

I. A. M. Tokmachev et al., Nat. Commun. **9**, 1672 (2018).

**СИНТЕЗ И СВОЙСТВА КОЛЛОИДНЫХ НАНОПЛАСТИНОК TiO_2 ,
ЛЕГИРОВАННЫХ $3d$ ЭЛЕМЕНТАМИ**

^{}А.И. Лебедев¹, И.А. Случинская¹*

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, тел. +7(495)9393917,
e-mail: swan@scon155.phys.msu.ru

**SYNTHESIS AND PROPERTIES OF COLLOIDAL TiO_2 NANOSHEETS
DOPED WITH $3d$ ELEMENTS**

^{}A.I. Lebedev¹, I.A. Sluchinskaya¹*

¹M.V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie gory, 1, 119991, Moscow, phone +7(495)9393917,
e-mail: swan@scon155.phys.msu.ru

Colloidal solutions of TiO_2 nanosheets doped with V, Mn, Fe, Co, Ni, and Cu with a thickness of one monolayer were prepared using a chemical route. A typical lateral size of 1 micron for an individual nanosheet was obtained from the SEM studies. Optical studies of the colloidal solutions revealed the fundamental absorption edge at 273–280 nm and specific features of the impurity absorption individual for different impurities. The electronic structure, magnetic structure, and the local environment of $3d$ impurities in doped nanosheets were calculated from first principles.

Коллоидные растворы нанопластинок TiO_2 , легированных различными $3d$ -элементами и имеющих толщину в один монослой [1], привлекают большое внимание исследователей в связи с обнаруженными в них уникальными свойствами – ферромагнетизмом при 300 К и гигантским магнитооптическим откликом [2, 3], природа которых до конца не ясна. Эти материалы могут представлять интерес для спинтроники, поскольку непроводящие ферромагнитные оксиды являются очень редкими материалами. Кроме того, фотокаталитические свойства легированных нанопластинок TiO_2 [4] представляют интерес для использования в системах генерации водорода и системах очистки воды от загрязнений, активируемых солнечным излучением.

Целью настоящей работы являлось получение нанопластинок TiO_2 , легированных $3d$ элементами, исследование их свойств, определение структуры примесных комплексов, образуемых $3d$ примесями в нанопластинках, и установление взаимосвязи между структурой этих комплексов и магнитными и каталитическими свойствами.

Для получения нанопластинок была использована методика, основанная на деламинации в растворе гидроксида тетрабутиламмония хими-

ческого соединения, полученного ионным замещением щелочного металла на водород в нестехиометрическом соединении со слоистой структурой лепидокрокита состава $K_{0.8}(Ti_{2-x}M_x)O_{4+\delta}$, в котором в качестве легирующей примеси M использовались примеси V, Mn, Fe, Co, Ni и Cu. Полученные образцы представляли собой бесцветные или окрашенные коллоидные растворы, не показывающие признаков старения в течение нескольких месяцев. Исследования в растровом электронном микроскопе позволили определить латеральные размеры нанопластинок, составляющие от долей до единиц мкм.

Исследования спектров оптического поглощения коллоидных растворов, легированных нанопластинок обнаружили край фундаментального поглощения при 273–280 нм, положение которого слабо зависело от сорта легирующей примеси. Сильный сдвиг края поглощения по отношению к объемному TiO_2 указывает на проявление эффекта размерного квантования. В образцах, легированных Co и Mn, за краем поглощения наблюдался далеко простирающийся в видимую область спектра хвост поглощения, который определяет коричневый цвет этих коллоидных растворов. Для остальных примесей поглощение в длинноволновой области выражено заметно слабее. Коэффициент поглощения в области собственного поглощения в растворе после деляминации достигал 500 см^{-1} .

Расчеты электронной, магнитной и кристаллической структур нанопластинок из TiO_2 , легированных примесями V, Cr, Mn, Fe, Co и Ni, проводились из первых принципов с помощью программы ABINIT в приближении LDA+ U с использованием PAW-псевдопотенциалов. В расчетах предполагалось, что все примеси находятся в зарядовом состоянии 4+. Спин примеси оказался равным $S = 1/2$ для V, 1 для Cr, $3/2$ для Mn, 1 для Fe, $1/2$ для Co и 0 для Ni. Для примеси Co была дополнительно рассчитана энергия комплексов, содержащих одновременно примесь и вакансию кислорода. Наименьшую энергию имела структура с вакансией, расположенной на поверхности нанопластинки. Кроме того, поскольку литературные данные указывают на возможность появления в нанопластинках вакансий титана, были проведены расчеты структуры нанопластинок с таким типом дефектов.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке грантом РФФИ № 17-02-01068.

Литература

1. M. Osada, T. Sasaki, Adv. Mater., **24**, 210 (2012).
2. M. Osada, Y. Ebina, K. Fukuda et al., Phys. Rev. B, **73**, 153301 (2006).
3. M. Osada, M. Itose, Y. Ebina et al., Appl. Phys. Lett., **92**, 253110 (2008).
4. S. L. Wang, X. Luo, X. Zhou et al., J. Am. Chem. Soc., **139**, 15414 (2017).

**ЭКСИТОННЫЙ КРУГОВОЙ ДИХРОИЗМ АТОМНО-ТОНКИХ
КОЛЛОИДНЫХ НАНОЛИСТОВ CdSe**

Д.А. Куртина¹, А.В. Гаршев¹, В.В. Шубин², Р.Б. Васильев¹

*¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 119991, Москва, Россия*

²ФИЦ Биотехнологии РАН, Ленинский пр-т, 33, 119071 Москва, Россия

**EXCITONIC CIRCULAR DICHROISM OF ATOMICALLY-THIN
COLLOIDAL CdSe NANOSHEETS**

D.A. Kurtina¹, A.V. Garshev¹, V.V. Shubin², R.B. Vasiliyev¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory

*²Research Center of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences,
Leninsky Ave. 33, 119071 Moscow, Russia*

Two-dimensional semiconductors exhibit unique electronic and optical properties arising from the atomic-scale thickness and 2D electronic structure. In present work, chiral exciton transitions in atomic-thin colloidal CdSe nanosheets induced by acetyl-L and D-cysteine were studied by circular dichroism spectroscopy and analyzed in dependence on thickness and lateral sizes.

Двумерные полупроводники обладают уникальными электронными и оптическими свойствами, отличными от свойств объемных материалов. В последние годы значительный интерес вызывают атомно-тонкие полупроводниковые наночастицы халькогенидов кадмия, выращенные коллоидными методами, из-за электронных свойств, которые аналогичны свойствам эпитаксиальных квантовых ям. Для подобных низкоразмерных полупроводниковых наноструктур характерны экситонные полосы люминесценции и поглощения, короткие времена жизни носителей заряда, большое сечение поглощения [1]. Набор данных оптических свойств делает такие наночастицы привлекательными для разработки светоизлучающих устройств, лазеров и фотодетекторов. В тоже время атомно-тонкая толщина и высокая степень анизотропии может представлять интерес для индуцирования хиральных экситонных переходов, как это ранее было показано для квантовых точек при их взаимодействии с хиральными органическими молекулами, что представляет существенный интерес для создания поляризационно-чувствительных оптоэлектронных устройств и сенсоров для распознавания биологических систем [2]. В настоящей работе хиральные экситонные переходы в атомно-тонких коллоидных нанолитах CdSe изучены методом спектроскопии кругового дихроизма.

Рост наноллистов CdSe проводили коллоидным методом в растворе ацетат кадмия - олеиновая кислота - октадецен при 110-160 °C [3, 4]. Тщательный подбор условий синтеза позволил вырастить коллоидные двумерные наночастицы (наноллисты) CdSe с толщиной всего 2 монослоя (0.6 нм) и протяженными латеральными размерами до 400 нм. Для индуцирования хиральных экситонных переходов стабилизатор - олеиновая кислота обменивалась на оптически активные молекулы L- и D-ацетилцистеина. Анализ кристаллической структуры, морфологии, элементного состава и покрытия поверхности лигандами был проведен с использованием методов HRTEM, HAADF-STEM, SAED, XRD и FTIR.

Оптические свойства наноллистов были изучены с помощью измерений методами спектроскопии поглощения, фотолюминесценции и кругового дихроизма. В спектрах поглощения наблюдались хорошо разрешенные экситонные переходы LH, HH и SO и выраженная полоса экситонной люминесценции в спектре фотолюминесценции. Обмен лигандов приводил к спектральному сдвигу всех полос на величину порядка 50 нм в красную область. Данный эффект обусловлен как увеличением толщины наноллистов ровно на один монослой, так и гибридизацией тиольной группы молекулы цистеина с экситонной подсистемой наночастиц. В спектрах кругового дихроизма найдены пять выраженных вращательных полос в спектральном диапазоне 300-500 нм с полушириной около 20 нм и величиной вращения до 100 мград, которые четко соотносятся с экситонными полосами в спектрах поглощения. Рассчитанный g -фактор $3 \cdot 10^{-3}$ является самым высоким значением, показанным для наночастиц полупроводников A^2B^6 . Было проанализировано влияние толщины и латеральных размеров наноллистов на спектры кругового дихроизма, а также изучено соотношение между вращательной силой переходов, расщеплением полос и их спектральным положением. Обсуждается модель возникновения экситонного кругового дихроизма в данных атомно-тонких наноллистах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-29-11694 и 19-03-00481.

Литература

1. R.B. Vasiliev et al., *Phys. Rev. B*, **95**, 165414 (2017).
2. W. Ma et.al., *Chem. Rev.*, **117**, 8041 (2017).
2. N.N. Shlenskaya Ma et.al., *Chem. Mater.*, **29**, 579 (2017).
3. R.B. Vasiliev et.al., *Chem. Mater.*, **30**, 1710 (2018).

**ВЛИЯНИЕ ГЛУБОКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА
НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ЕГО ХЛОПЬЕВ И СИНТЕЗ
ИЗ НИХ ОКСИДА ГРАФЕНА**

Л.В. Табулина¹, М.М. Михалик¹, Ю.П. Шаман², ^{*}И.В. Комиссаров¹

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

²Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1

**THE IMPACT OF FINE MILLING ON CRYSTAL STRUCTURE
OF PYROLYTIC GRAPHITE FLAKES AND GRAPHENE OXIDE SYNTHESIS**

L.V. Tabulina¹, M.M. Mikhailik¹, Yu.P. Shaman², ^{*}I.V. Komissarov¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Republic of Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka str. 6, e-mail: komissarov@bsuir.by

²Research-and-production complex "Technology Center"
Russia, 124498 Moscow, Zelenograd, sq. Shokin 1

A positive effect of deep grinding by ball milling of pyrolytic graphite monolithic plates on the hydrophilicity and physicochemical characteristics of graphene oxide synthesized out of it has been established. It was found that graphene oxide synthesized out of ball milled monolithic pyrolytic graphite is more enriched in oxygen-containing groups and has a more perfect crystalline structure compared to the commercially available powder of fine pyrolytic graphite.

Получение графена осуществляют разными методами, но наиболее экономичным является способ, основанный на использовании оксида графена. Всплеск внимания к оксиду графена и увеличение объема его производства обусловлен многими причинами. В частности, таким необычным для графитовых материалов свойством, как гидрофильность, а также возможностью получать в большом количестве восстановленный графен.

В настоящей работе для синтеза оксида графена использованы монолитные пластины пиролитического графита, применяющиеся в качестве электродов в электрических сетях, подверженные глубокому измельчению при помощи шаровой мельницы до размеров хлопьев ≤ 100 мкм. По методу Хаммерса был синтезирован оксид графена с использованием перманганата калия и концентрированной серной кислоты. В работе был использован также мелкодисперсный графитовый порошок, состоящий из хлопьев величиной 9,3 – 47,2 мкм, полученный пиролитическим синтезом (графит фирмы «Imerys»).

Графитовый материал и синтезированные из них окисленные графеновые модификации исследованы при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния (рис. 1) и растровой электронной микроскопии (рис. 2).

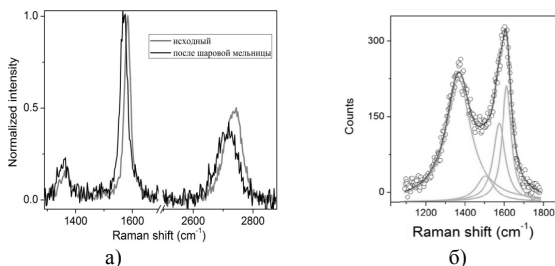


Рис. 1. Спектры КР графитовых материалов и синтезированного оксида графена, соответственно (а) и (б)

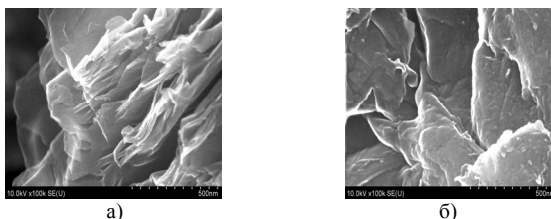


Рис. 2. Снимки РЭМ хлопьев оксида графена, полученные из измельченного графита (а) и фирмы «Imerys» (б)

Как показали данные термического анализа, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии и динамического рассеяния света, хлопья оксида графена более обогащены кислородсодержащими группами, обладают более низкой термической устойчивостью и гидрофильностью по сравнению с идентичным материалом, полученным из графита фирмы «Imerys». Это говорит о деструктивном влиянии глубокого измельчения пиролитического графита на кристаллическую структуру формирующихся графитовых хлопьев, что позитивно сказывается на величине, однородность распределения по размерам хлопьев оксида графена, их нанозмерную толщину.

Коллектив авторов из БГУИР выражает благодарность Белорусскому фонду фундаментальных исследований (договор № Ф18ПЛШГ-009) за финансовую поддержку.

**ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР ИЗ ДВУХСЛОЙНОГО ГРАФЕНА
НА ПОДЛОЖКЕ SiO₂/Si ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ**

*** Н.Г. Ковальчук¹, К.А. Нишерий¹, А.В. Фельшерук¹, И.А. Свито², Т. Тамулевичюс^{3,4},
С. Тамулевичюс^{3,4}, Н.И. Каргин⁵, И.В. Комиссаров^{1,5}, С.Л. Прищепа^{1,5}**

¹Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: n.kovalchuk@bsuir.by

²Белорусский Государственный Университет,
пр. Независимости. 4, 220030, Минск, Беларусь

³Институт материаловедения Каунасского технологического университета,
ул. К. Баршауско 59, LT-51423, Каунас, Литва

⁴Кафедра физики Каунасского технологического университета,
ул. Студенту 50, LT-51368, Каунас, Литва

⁵Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Каширское шоссе. 31, Москва, 115409, Россия

**FORMATION OF MICROSTRUCTURES FROM BILAYER GRAPHENE
ON A SiO₂/Si SUBSTRATE BY FEMTOSECOND LASER**

*** N.G. Kovalchuk¹, K.A. Niherysh¹, A.V. Felsharuk¹, I.A. Svit², T. Tamulevičius^{3,4},
S. Tamulevičius^{3,4}, N.I. Kargin⁵, I.V. Komissarov^{1,5}, S.L. Prischepa^{1,5}**

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Browka Str. 6, 220013 Minsk, Belarus, e-mail: n.kovalchuk@bsuir.by

²Belarusian State University, Nezalezhnasti Av. 4, 220030, Minsk, Belarus

³Institute of Materials Science, Kaunas University of Technology,
K. Baršausko Str. 59, LT-51423, Kaunas, Lithuania

⁴Department of Physics, Kaunas University of Technology,
Studentų Str. 50, LT-51368, Kaunas, Lithuania

⁵National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe Hwy. 31, Moscow, 115409, Russia

Graphene grown by the CVD method transferred on SiO₂/Si substrate was selectively structured by femtosecond laser ablation to form a topology for measuring charge carriers. The following parameters were recognized as the optimal mode for high-performance ablation of the microstructure in graphene without superficial damage to the substrate: ultrashort 1030 nm wavelength Yb:KGW fs-laser pulses of 22 μJ energy, 14 mJ/cm² fluence, 96% pulse overlap and scanning speed of 100 mm/s. Optical and scanning electron microscopy as well as Raman spectroscopy were applied to clarify the intensive fs-laser light irradiation effects on graphene and substrate as well as to verify the quality of the graphene removal. Measurement of the magnetotransport properties of the microstructure of nitrogen-doped graphene subjected to ablation using an fs-laser was carried out in the Hall configuration, which allowed determining the type and concentration of charge carriers in a wide temperature range.

В представленной работе графен был выращен методом ХПО при атмосферном давлении из химически чистого декана на медной фольге (Alfa Aesar) при температуре 1050 °С. Образцы синтезировались в присутствии потока газа N_2 (99,95%) и H_2 (99,99%) со скоростями 100 и 6 $см^3/мин$ соответственно. Такой подход позволил синтезировать двухслойный графен, что было подтверждено детальным анализом данных комбинационного рассеяния света [1]. После осаждения графен перенесли на подложку SiO_2 (~ 700 нм)/Si, методом жидкостного переноса. Комплексный РФЭС-анализ показал, что графен легирован азотом с концентрацией азота $n_N \approx 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Лазерная абляция проводилась с использованием фемтосекундного Yb:KGW лазера ($\lambda = 1030 \text{ нм}$, $\tau = 270 \text{ фс}$, $P = 4 \text{ Вт}$) в двух режимах. Первый режим использовался для получения оптимальных условий удаления графена. Второй режим был применен для создания изображения на графене, перенесенном на подложку SiO_2/Si . На полученной микроструктуре были проведены измерения эффекта Холла.

На рисунке 1 показано оптическое изображение графенового мостика вместе с электрической схемой и ориентацией магнитного поля.

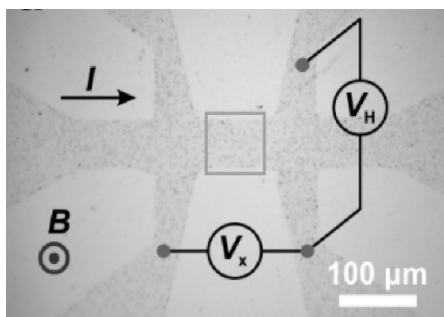


Рис. 1. Графеновая микроструктура, используемая для электрических измерений Холла

Литература

1. I.V. Komissarov et al., Beilstein J. of Nanotech., 8, 145-158 (2017).

ЗОННАЯ СТРУКТУРА ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА

**А.В. Баглов¹, Л.С. Хорошко¹*

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

BANDSTRUCTURE OF GRAPHITIC CARBON NITRIDE

**A.V. Baglov¹, L.S. Khoroshko¹*

¹Belarusian state university of informatics and radioelectronics, Republic of Belarus, 220013, P. Browka str., 6, e-mail: baglov@bsuir.by

The results of the study of the graphite-like carbon nitride modification with a hexagonal syngony using quantum-chemical modeling are presented. The parameters of the unit cell, band structure and density of electronic states in the bulk material are calculated. It is established that this modification of carbon nitride is a semiconductor with direct band gap of 1,30 eV. Taking into account the underestimation calculated band gap, the material may be promising for use in the composition of catalysts, interband-type scintillators and for photovoltaics devices.

Последние годы новую волну интереса вызывают материалы на основе соединений азота и углерода, в частности стехиометрического состава C_3N_4 с различной кристаллической структурой, в том числе орторомбической [1], кубической [2], гексагональной сингониями [3], впервые открытыми экспериментально в прошлом десятилетии. Считается, что связанные молекулы гептазина образуют одну из модификаций графитоподобного нитрида углерода. В данной работе исследована иная кристаллическая модификация графитоподобного C_3N_4 , включающая 14 атомов в элементарной ячейке.

Расчет зонной структуры, плотности электронных состояний (ПЭС) и оптимизацию геометрии элементарной ячейки проводили в рамках теории функционала плотности и метода псевдопотенциала, реализованных в пакете OpenMX [4 – 7]. В расчете использовали приближение локальной плотности и учитывали 2p- и 2s-электроны всех атомов как валентные. Энергию отсечки выбирали равной 150 Ry (Ридберг), критерий сходимости расчета самосогласованного поля составлял 10^{-6} Ry, оптимизацию элементарной ячейки с изменяемым объемом продолжали до тех пор, пока силы, действующие на атомы, становились менее 0,0006 Ry/Å. После оптимизации были получены следующие параметры элементарной ячейки: $a = b = 4,74$ Å, $c = 6,65$ Å. Материал представляет собой прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 1,30 эВ и прямым

переходом в точке Г (рис. 1). Валентная зона, в основном, образована электронами азота, а зона проводимости – электронами азота и углерода в примерно равной пропорции. С учетом того, что расчеты в приближении локальной плотности обычно недооценивает ширину запрещенной зоны, а эксперименты показывают сильную фотолюминесценцию нитрида углерода в области 400 – 500 нм, мы предполагаем, что данная модификация частично обуславливает эти люминесцентные свойства.

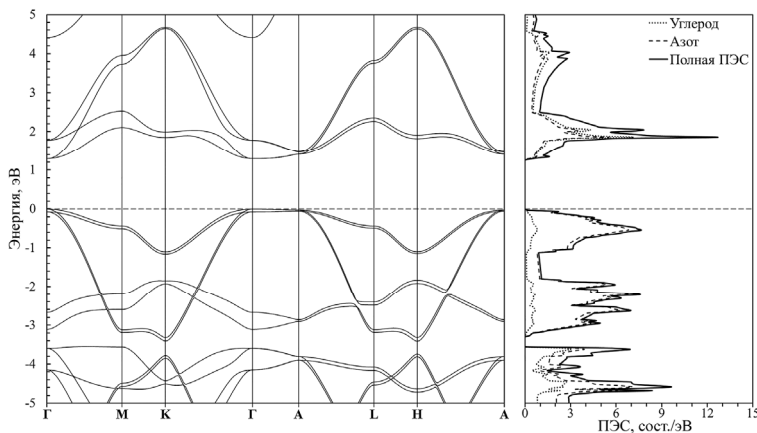


Рис. 1. Зонная структура и ПЭС объемного гексагонального C_3N_4 . За ноль на шкале энергий принят потолок валентной зоны

Таким образом, показано существование модификации графитоподобного нитрида углерода со структурой, отличной от структуры, образованной полимеризованными молекулами гептазина. Установлено, что данная модификация нитрида углерода является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,30 эВ. Учитывая реальное значение ширины запрещенной зоны, превышающее расчетное, материал может быть перспективен для применения в составе катализаторов, сцинтилляторов и для устройств фотовольтаики.

Литература

1. M. Mattesini et al., J. Mater. Chem., **10**, 709 – 713 (2000).
2. P.V. Zinin et al., J. Phys.: Conf. Ser., **121**, 062002 (2008).
3. D.L. Yu et al., J. Mater. Sci. Lett., **19**, 553 (2000).
4. T. Ozaki, Phys. Rev. B, **67**, 155108 (2003).
5. T. Ozaki, Phys. Rev. B, **69**, 195113 (2004).
6. T. Ozaki and H. Kino, Phys. Rev. B, **72**, 045121 (2005).
7. K. Lejaeghere, Science, **351**(6280), aad3000 (2016).

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРАФЕНА С ПОВЕРХНОСТЬЮ НИТРИДА КРЕМНИЯ:
КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

^{}Д.Ч. Гвоздовский¹, В.Р. Стемпицкий¹*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6, e-mail: gvozдовsky@bsuir.by

**INTERACTION BETWEEN GRAPHENE AND SILICON NITRIDE SURFACE:
QUANTUM-MECHANICAL SIMULATION**

^{}D.C. Hvozдовski¹, V.R. Stempitskiy¹*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Republic of Belarus, 220013, Minsk, P. Brovki str. 6, e-mail: gvozдовsky@bsuir.by

First-principles calculations were carried out by the Vienna Ab initio Simulation Package (VASP). Preliminary calculations showed that DFT-D3 method with Becke-Jonson damping presents good agreement of lattice constant with experiment data. Ground state of graphene position on the Si₃N₄ surface has been determined. Interlayer distance (3.04 Å) and adsorption energy (21.3 kJ/Mol) have been calculated between graphene and silicon nitride substrate. Changes in the electronic states of graphene under the action of a substrate not observed in the immediate vicinity of the Fermi level. The values of the adsorption energy and distance between graphene and substrate corresponds to physical type adsorption with a strong influence of van der Waals forces.

Материал подложки оказывает существенное энергетическое влияние на электрофизические свойства графена [1-3]. Актуальной задачей является количественная и качественная оценка степени воздействия подложки на электронные свойства графена с целью выбора материала, обеспечивающего его адсорбцию и эффективное применение. Взаимодействие атомов углерода с атомами поверхности определяется энергией связи атомов графена с поверхностью подложки.

Расчеты периодических структур выполнялись на основании теории функционала плотности [4], реализованной в (VASP) [5]. Для описания внешних электронных оболочек использовались конфигурации валентных электронов [Ne] 3s²3p², [He] 2s²2p² и [He] 2s²2p³ для атомов кремния, углерода и азота соответственно. Значение энергии обрезания - 520 эВ. Интегрирование в импульсном пространстве осуществлялось по сетке точек 11×11×1. Разница постоянных решеток для построенных суперячеек графена 3×3×1 и нитрида кремния 1×1×2, не превысила 2 %. С целью исключения взаимного влияния волновых функций, характерного для

особенностей реализации квантово-механического моделирования для суперячейки «графен/ β - Si_3N_4 » создан вакуумный слой толщиной 15 Å вдоль кристаллографического направления z.

Полученное в расчетах значение энергии адсорбции атомов углерода (графена) на поверхности подложки не превышает 21,3 кДж/моль.

Оценка положения атомов углерода на поверхности β - Si_3N_4 для исследуемой системы осуществлена посредством оптимизации структуры «графен/ β - Si_3N_4 ». Установлено, что атомы углерода графена находятся на расстоянии 3,04 Å от поверхности Si_3N_4 подложки. Разница расстояний между атомами углерода и приповерхностными атомами нитрид кремния не превышает 0,3 мÅ и носит относительно равномерный характер.

Анализ зонной диаграммы системы показал, что подложка из β - Si_3N_4 не оказывает значительного влияния на электронную структуру адсорбированного графена. Энергетический закон дисперсии графена вблизи уровня Ферми и в интервале энергий от -1,8 до 0,7 эВ остается линейным. Адсорбированный на поверхности нитрида кремния графен имеет нулевую величину запрещенной зоны, для него также характерно равномерное распределение плотности заряда.

Для системы «графен/ β - Si_3N_4 » учитывая величину энергии адсорбции (21,3 кДж/моль) и расстояние между слоем графена и поверхностью подложки (3,04 Å), отсутствие переноса заряда с атомов углерода на подложку нитрид кремния, можно сделать предположение о наличии физической адсорбции графена на поверхности подложки нитрида кремния. В данном случае атомы углерода связываются с приповерхностными атомами подложки посредством слабых сил Ван-дер-Ваальса.

Таким образом, в рамках проведенных исследований установлено, что подложка нитрида кремния не оказывает влияния на электронные свойства графена и может выступать в качестве основной диэлектрической подложки для применения в графеновой электронике, в том числе, благодаря высокой диэлектрической проницаемости (~ 7), умеренной теплопроводности ($\sim 170\div 200 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) и низкому коэффициенту линейного расширения ($3,4\cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$).

Литература

1. K. Geim, K.S. Novoselov, Nat. Mater., **6**, 183 (2007).
2. F. Schwierz, Nat. Nanotechnol., **5**, 487 (2010).
3. H. Castro Neto, F. Guinea et al., Rev. Mod. Phys., **81**, 109 (2009).
4. R.G. Parr, W. Yang, DFT of Atoms and Molecules (Oxford University Press, 1989).
5. G. Kresse and D. Joubert, Phys. Rev., **59**, 1758 (1999).

**СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА,
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
ТИОМОЧЕВИНЫ**

^{}А.В. Баглов¹, Е.Б. Чубенко¹, А.А. Гнирко¹, Е.С. Лисимова¹*

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

**STRUCTURAL PROPERTIES OF GRAPHITE-LIKE CARBON NITRIDE OBTAINED
BY THE PYROLYTIC DECOMPOSITION METHOD OF THIOUREA**

^{}A.V. Baglov¹, E.B. Chubenko¹, A.A. Gnirko¹, E.S. Lisimova¹*

¹Belarusian state university of informatics and radioelectronics,
Republic of Belarus, 220013, P. Browka Str., 6, e-mail: baglov@bsuir.by

Graphite-like carbon nitride was fabricated by the pyrolytic decomposition method of thiourea. This material in a powder form has submicron scale corall-like structure with incorporated lamellas of 300 – 400 nm thickness. Such a complex structure may be promising for photocatalytic applications.

В последнее время в прикладной науке возрастает интерес к синтезу и исследованию фотокаталитических свойств слоистых материалов, в особенности графитоподобного нитрида углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$). Данное соединение является перспективным материалом для практического применения за счет относительной простоты синтеза путем пиролитического разложения органических прекурсоров и высокой фотокаталитической активности, в том числе и под излучением видимого диапазона [1, 2]. В данной работе мы приводим результаты исследования структурных свойств графитоподобного нитрида углерода, полученного пиролизом тиомочевина.

Методика синтеза была следующей. В чистый керамический тигель объемом 20 мл помещали 2 г тиомочевина ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$) чистотой не менее 98%. Тигель герметизировали 8-слойным листком алюминиевой фольги, плотно прижатым к его открытой части, для уменьшения истечения газов из тигля в процессе пиролиза, а также для изоляции синтезированного материала от атмосферного кислорода в процессе остывания. Пиролиз проводили в муфельной печи при температуре 500 °С в течение 30 мин. Средняя скорость нагрева печи от комнатной температуры до температуры синтеза составляла 12 °С/мин. Структуру полученного материала исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Поверхность синтезированного материала шероховатая и состоит из блоков различного размера и формы (рис. 1, а). При большем увеличении

по всему объему можно обнаружить неравномерно распределенные пластинки материала толщиной 300 – 400 нм, уходящие вглубь материала, по косвенным признакам, не более чем на 20 – 25 мкм (рис. 2, б). Остальная часть материала представляет собой кораллоподобную структуру субмикронного масштаба. Внешний вид структуры, а также отсутствие пластинок на поверхности свидетельствует о том, что она формировалась в процессе плавления и последующего разложения тиомочевины, сопровождавшегося выделением газов, образовавших такую структуру. Формирование пластинок в объеме может быть связано с конденсацией материала на внутренней поверхности алюминиевой фольги в виде пленки толщиной 300 – 400 нм с последующим отделением и возвратом в объем тиомочевины. Проведенными дополнительно рентгеновскими и фотолюминесцентными исследованиями подтверждено формирование в приведенных условиях $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

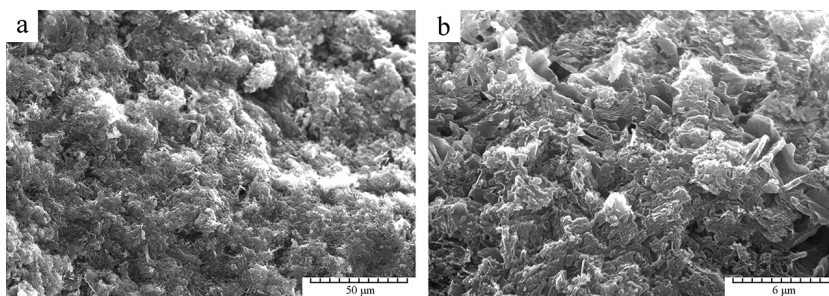


Рис. 1. Поверхность синтезированного при 500 °C $g\text{-C}_3\text{N}_4$ при различном увеличении

Таким образом, установлено формирование материала, обладающего сложным строением – субмикронной кораллоподобной структурой с инкорпорированными пластинками. Такая структура, особенно в иммобилизованном виде, может быть перспективна для фотокаталитических приложений.

Работа выполнена в рамках ГПНИ Республики Беларусь «Конвергенция-2020» (задание 3.05) и гранта Министерства образования Республики Беларусь для докторантов.

Литература

1. L. Ma et al., J. Mater. Chem. A, **3**, 22404 – 22412 (2015).
2. C. Wang et al., Mater. Charact., **139**, 89 – 99 (2018).

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ
НАНОПРОВОДОВ InSb В ПОРИСТЫХ МАТРИЦАХ
С БОЛЬШИМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ**

**А.А. Лозовенко¹, А.А. Позняк¹, Г.Г. Горох¹*

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

**FEATURES OF InSb NANOWIRES ELECTROCHEMICAL FORMATION
IN POROUS MATRIXES WITH A LARGE ASPECT RATIO**

**A.A. Lazavenka¹, A.A. Poznyak¹, G.G. Gorokh¹*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, BSUIR
Belarus, 220013 Minsk, Brovki Str. 6, e-mail: lozovenko@bsuir.by

The kinetic features of the nanowires growth in the pores of anodic alumina are investigated and the conditions for the pores complete filling during the synthesis of InSb nanowires with a large aspect ratio are shown.

Нанопровода антимионид индия благодаря своим уникальным электрофизическим и оптическим свойствам активно исследуются для применения в микро-, нано- и оптоэлектронике. Электрохимический темплетный синтез нанопроводов в пористые матрицы, в частности, анодного оксида алюминия (АОА), является простым в реализации методом создания наноструктур [1]. На практике применяются короткие нанопровода – в квантовых генераторах и фотоэлектрических ячейках [2], и длинные нанопровода с большим аспектным отношением (<1000) – в термоэлектрических генераторах или батареях [3]. Формирование последних связано с определенными проблемами. В работе проведено исследование влияния электрохимических условий осаждения антимионид индия на степень заполнения пористых матриц и на микроструктуру нанопроводов.

Исследования проводили на пористых матрицах АОА толщиной 35 мкм с диаметрами пор от 50–60 нм, и золотым катодным подслоем, нанесенным на пористую сторону матриц [1]. Барьерный оксидный слой удаляли в 5% растворе H₃PO₄ в течение 8 минут при 50 °C, в результате чего диаметры пор увеличились до 60-85 нм. Электрохимическое осаждение нанопроводов InSb проводили из водного раствора состава 0,1 М SbCl₃, 0,15 М InCl₃, 0,36 М C₆H₈O₇ и 0,17 М K₃C₆H₅O₇, в потенциостатическом режиме с регистрацией тока при помощи LabView. На рис. 1 показаны кинетики осаждения InSb при E = const и микрофотографии сколов, полученных образцов при завершении процесса на соответствующих участках кинетики.

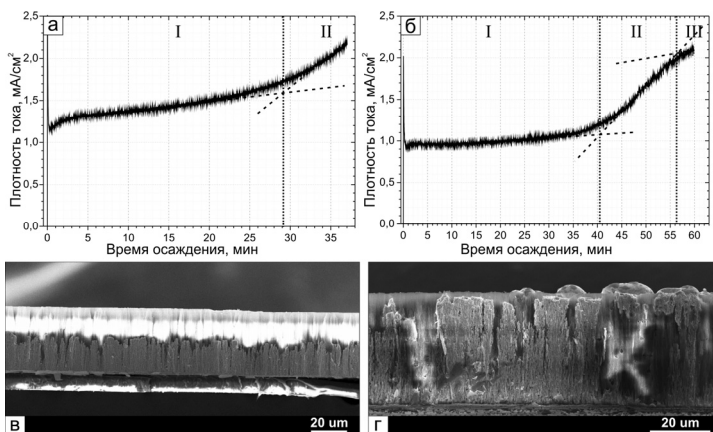


Рис. 1. Кинетики осаждения InSb в пористые матрицы (а, б) и СЭМ изображения сколов образцов матриц с нанопроводами (в, г)

Изгиб на кинетике (рис. 1, а) свидетельствует о полном заполнении матрицы, начале образования зародышей InSb на поверхности, увеличении активной площади осаждения и, следовательно, плотности тока [4], однако матрица заполнена на половину (рис. 1, б). Фактически полное заполнение пор и образование зародышей InSb на поверхности наблюдается только на стадии 3 кинетики (рис. 1, б, г). Полученные результаты можно объяснить в рамках модели [5] электрохимического осаждения в пористые матрицы. Авторами показано, что искривление профиля концентрации ионов в порах во время осаждения при соизмеримых морфологических параметрах матрицы, может составлять 15 μm . Снижение концентрации ионов порах ведут к диффузионному ограничению катодного тока, и уменьшению скорости осаждения согласно предлагаемой модели. Исследованы кинетические особенности роста нанопроводов в порах АОА и показаны условия полного заполнения пор в процессе синтеза нанопроводов InSb с большим аспектным отношением. Полученные данные позволят воспроизводимо синтезировать массивы нанопроводов с требуемыми морфологическими параметрами.

Литература

1. G. Gorokh et al., (Microwave and Telecom. Tech. CriMiCo'2013) **2**, 820 (2013).
2. И. Обухов и др., Наноиндустрия, **6**, 96 (2017).
3. G. Gorokh et al., Semiconductors, **51**(7), 887 (2017).
4. T. Molares et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **185**(1-4), 192 (2001).
5. S. Blanco et al., J. Electrochem. Soc., **161** (8), E3341 (2014).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO,
ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ НАНЕСЕНИЯ**

^{}A.O. Zotov¹, M.B. Kislicin¹, A.A. Perevalov¹*

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», кафедра ИЭМС
Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, стр. 4, e-mail: ardents@bk.ru

**FORMING METHODS RESEARCH AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES
OF FERROELECTRIC FILMS ZnO STUDY**

^{}A.O. Zotov¹, M.V. Kislicin¹, A.A. Perevalov¹*

¹National Research University of Electronic Technology «MIET», dep. IEMS
Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Russia, Shokin square, h. 4, e-mail: ardents@bk.ru

Zinc oxide possesses an interesting combination of physical and chemical properties: a high melting point and thermal conductivity, photosensitivity, piezoelectric and pyroelectric effects, the adsorption of gases on the surface. This material is widely used in microelectronics, chemistry and medicine. ZnO crystals, thin films and diode structures based on it are the subjects for scientific studies and applications. Today, a thin films structure are playing a big role in micro and nanoelectronics development. They are used in electronic and optical devices fabrication and as reinforcing and decorative coatings. Materials combination allows to get new properties of structures that could have completely new physical and electrical properties. An anisotropic crystal structure, a non-stoichiometric composition, semiconductor properties with a large band gap and other properties make this material not only interesting but also quite complex object for study. The dependence of the characteristics of ZnO thin film on the preparation conditions and various external factors is currently of great interest, for example in the semiconductor sensor technology. In connection with the aforementioned, in the present work has been investigated a technological regimes of deposition, the conductivity and dielectric properties of structure contained a thin layer of zinc oxide.

В настоящее время тонкопленочные структуры вносят существенный вклад в развитие микро- и нанoeлектроники. Они нашли свое применение в области изготовления электронных и оптических приборов, используются в качестве упрочняющих и декоративных покрытий. Путем комбинирования и варьирования материалов возможно получение свойств структур, обладающих качественно новыми физическими и электрическими свойствами.

В данном исследовании представлена серия экспериментов по изучению электрических свойств пьезоэлектрических пленок ZnO в составе

гетероструктуры $\text{Ti}/\text{ZnO}/\text{Ti}$, осажденных различными методами: золь-гель методом, магнетронным распылением мишени ZnO и атомно-слоевым осаждением. Исследовали удельное объемное сопротивление, измеряя поверхностное сопротивление (4-х зондовым методом) и толщину пленок (атомно-силовой микроскопией). Контроль элементного состава пленок осуществляли на основе EDX-анализа. По рентгеновским спектрам определяли структуру пленок.

Установлено, что золь-гель метод обеспечивает лишь формирование полупроводниковой пленки ZnO , она обладает аморфной структурой и не проявляет пьезоэлектрических свойств. Термический отжиг пленок в диапазоне 300-800 °C приводил к изменению структуры с аморфной на поликристаллическую. Пленки проявляли слабые пьезоэлектрические свойства.

Для пленок, нанесенных методом магнетронного распыления, характерна поликристаллическая структура, они являются диэлектрическими и проявляют пьезоэлектрические свойства.

Пленки, сформированные методом атомно-слоевым осаждения, также имеют поликристаллическую структуру и характеризуются улучшенными пьезоэлектрическими свойствами.

**ДИФРАКЦИОННЫЙ РЕЖИМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ ФОНОНОВ
ГИПЕРЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ В ПЛАСТИНАХ АЛМАЗА
ПРИ КОМНАТНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

****А.И. Шарков¹, А.Ю. Клоков¹, Р.А. Хмельницкий¹, В.А. Цветков¹, С.А. Евлашин²***

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53, e-mail: shark@lebedev.ru

²НИИ ядерной физики МГУ имени Д.В. Скобелевца

Россия, 119992, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, к. 2, e-mail: stevlashin@gmail.com

**DIFRACTION MODE OF HTPERSOMIC COHERENT PHONONS PROPAGATION
IN DIAMOND WAFERS AT ROOM TEMPERATURES**

****A.I. Sharikov¹, A.Yu. Klokov¹, R.A. Khmelnitsky¹, V.A. Tsvetkov¹, S.A. Evlashin²***

¹P.N. Lebedev Physical Institute RAS

Russia, 119991, Moscow, Leninskii pr. 53, e-mail: shark@lebedev.ru

²D.V. Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University,

Russia, 119992 Moscow, Leninskie Gory 1(2), e-mail: stevlashin@gmail.com

The propagation of coherent phonons with a frequency of tens of gigahertz and surface acoustic waves was studied in the heteroepitaxial NiCu films on diamond plates heterostructure. i. The attenuation of hypersound in a NiCu heteroepitaxial film grown on a diamond substrate was measured. ii. Excitation of surface acoustic waves propagating with a speed of $\sim 9.5 \mu\text{m/s}$ was found. iii. Multiple reflections from the sample boundaries of elastic pulses with frequencies of 30–40 GHz propagating in the diffraction mode were detected.

В данной работе методом пикосекундной акустики мы исследовали распространение когерентных фононов частотой в десятки гигагерц в гетероэпитаксиальных плёнках NiCu на алмазе, в пластинах алмаза, а также поверхностных акустических волн (ПАВ).

В качестве образцов использовались полированные клиновидные (угол клина 1.4°) пластины природного алмаза типа Ia ориентации (001) и (101) толщиной ~ 180 мкм. Металлические плёнки NiCu толщиной ~ 120 нм формировались путём магнетронного распыления в атмосфере Ag на постоянном токе. Получаемые таким образом плёнки NiCu, обладают превосходной адгезией к алмазу [1].

Методика возбуждения и регистрации когерентных фононов была аналогична [2]. Фемтосекундный импульс возбуждения второй гармоники титан-сапфирового лазера (160 фс, 0.4 нДж 400 нм) фокусировался на пятно диаметром 1.5 мкм на поверхности образца. Изменения в амплитуде и фазе коэффициента отражения импульса первой гармоники того же лазерного луча (800 нм), сканирующего по поверхности образца, регистрировались с помощью интерферометра Саньяка. Чувствительность

составляла ~ 1 мкрад для фазы и $\sim 10^{-6}$ для амплитуды коэффициента отражения соответственно, пространственное разрешение составляло ~ 1.5 мкм, а временное < 1 пс.

На рис. 1 приведены картины поля упругих напряжений на поверхности пластины при различных задержках между зондирующим и возбуждающим импульсами. В нижнем правом углу видна поверхностная акустическая волна, распространяющаяся от точки возбуждения со скоростью ~ 9.85 мкм/нс. Круговые фигуры для нескольких последовательных моментов времени представляют собой результат прихода объёмной волны, отражённой от тыльной поверхности образца. Обнаружено многократное отражение от границ образца упругих импульсов с частотами ~ 35 ГГц, распространяющихся в режиме дифракции. С увеличением угла дифракции спектральный состав обедняется в высокочастотной области.

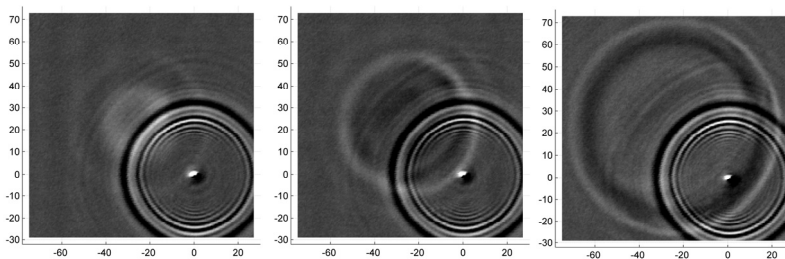


Рис.1. Картины поля упругой волны на поверхности образца в моменты времени: 3676 пс (слева), 3710 пс (в центре), 3770 пс (справа)

Кроме того, были зарегистрированы эхо-импульсы отражения фононов от границы гетероэпитаксиальная пленка NiCu / алмаз. При облучении фемтосекундными лазерными импульсами плёнки генерируют когерентные фононы с частотами до ~ 70 ГГц. После нескольких отражений от поверхности пластины упругий импульс регистрировался со стороны металлической плёнки.

Сравнение спектров первого и второго акустических эхо-сигналов позволяют определить затухание гиперзвука в плёнке [3]. Оказалось, что частотная зависимость затухания в диапазоне 35–100 ГГц близка к квадратичной, а коэффициент отражения от границы плёнка / алмаз близок к полученному по теории акустического рассогласования.

Литература

1. R. Khmelitsky et al., Cryst. Growth. Design, **16**(3), 1420-1427 (2016).
2. T. Tachizaki et al., Rev. Sci. Instr., **77**, 043713 (2006).
3. C. J. Morath and H. J. Maris, Phys. Rev. B, **54**, 1 (1996).

**ФОРМИРОВАНИЕ NV-ЦЕНТРА В АЛМАЗЕ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ НЕОРТОГОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
СИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

**М.О. Смирнова^{1,2}, А.А. Бухтияров², А.В. Голованов³, О.В. Коровин^{1,2}, С.А. Тарелкин³,
С.Д. Трофимов³*

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

**THE FORMATION OF NV-CENTER IN DIAMOND: MOLECULAR DYNAMIC
SIMULATION BY NONORTHOGONAL TIGHT-BINDING MODEL**

**M.O. Smirnova^{1,2}, A.A. Buhtiyarov², A.V. Golovanov³, O.V. Korovin^{1,2}, S.A. Tarelkin³,
S.D. Trofimov³*

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: mosmirnova@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

We present molecular dynamics study of NV-centers formation in diamond. The last stage of merging of vacancy and nitrogen impurity was simulated with non-orthogonal tight-binding potential. All considered atoms movements were integrated in accordance with the Newton's equation of motion. Channels and kinetics of merging process were studied in detail. Temperature dependence of merging was obtained and activation energy of the considered process was derived. The study provide further insight about NV-center formation at the atomistic level.

Квантовые информационные системы применяются при создании квантовых компьютеров, квантовых коммуникационных и метрологических систем и др. Работа таких устройств основана на квантовомеханическом подходе и использовании таких явлений как суперпозиция и запутывание, что принципиально повышает производительность и защищенность каналов связи от несанкционированного доступа.

Элементарной ячейкой памяти квантового устройства называется кубит. В настоящее время проводятся активные исследования по разработкам упорядоченной матрицы, состоящей из большого количества кубитов, которую можно рассматривать как основу для квантовых регистров

памяти. Для ее создания требуется выполнение следующих условий: наличие хорошо изолированной системы, состояние которой можно инициализировать и контролировать, обладающей возможностью масштабирования. Среди многих изученных систем NV-центр стал наиболее привлекательным кандидатом на роль кубита [1] благодаря своим атомно-подобным свойствам и жесткой локализации в кристаллической решетке алмаза при комнатной температуре.

Для создания упорядоченного массива, состоящего из NV-центров, требуется развитие технологии их формирования с заданными свойствами и известными координатами. Общий подход образования центров состоит из нескольких этапов: формирование азотных примесей, формирование вакансий и дальнейший высокотемпературный отжиг, который способствует объединению атома азота и вакансии в стабильный NV-центр. Количество и качество получившихся дефектов определяется способом создания и концентрацией вакансий/азотных дефектов, температурой и временем отжига.

В представленной работе проведено молекулярно-динамическое моделирование процесса слияния вакансии с азотной примесью. Расчеты проводились в рамках неортогонального потенциала сильной связи [2], применимого для атомов углерода с разными типами гибридизации. Уравнения Ньютона интегрировались с временным шагом 0.2 фс при помощи скоростного алгоритма Верле [3]. Алмаз представлялся ячейкой C64, помещенной в периодические граничные условия. Температура поддерживалась постоянной при помощи термостата Андерсена [4]. Расчет проводился при различных температурах и длился до тех пор, пока не произойдет слияния вакансии и примеси. Температурная зависимость времени слияния позволила оценить энергию активации этого процесса.

Литература

1. L. Childress and R. Hanson, MRS Bulletin, 38, 134 (2013).
2. M.M. Maslov, A.I. Podlivaev, L.A. Openov, Phys. Lett. A, 373, 1653-1657 (2009).
3. L. Verlet et al., Phys. Rev., 159, 98–103 (1967).
4. H.C. Andersen, J. of Chem. Phys., 72(4) (1980).

СТРУКТУРА И УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАМКНУТЫХ АЗОТНЫХ СИСТЕМ

В.Б. Меринов¹, К.П. Катин¹, К.С. Гришаков¹, М.М. Маслов¹, Р.В. Рыжук¹, Н.И. Каргин¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31

STRUCTURE AND STABILITY OF HIGH-ENERGY CLOSED NITROGEN SYSTEMS

V.B. Merinov¹, K.P. Katin¹, K.S. Grishakov¹, M.M. Maslov¹, R.V. Ryzhuk¹, N.I. Kargin¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse, dom 31

According to Euler’s formula, different closed nitrogen frameworks have been constructed. Among them are prisms, cages, and fullerene-like structures. The energy and electronic properties (namely, HOMO-LUMO gaps) of the obtained systems have been analyzed by means of density functional theory using hybrid B3LYP functional with the Pople 6-31G(d) and Dunning aug-cc-pVTZ electron basis sets. It was obtained that for the nitrogen fullerenes the common isolated pentagon rule was not performed. Moreover, some cages consisting of nitrogen triangles, squares, and pentagons proposed for the first time were found to be stable.

Применяя формулу Эйлера, были построены различные замкнутые азотные каркасы. Построенные клетки различаются по форме: призмы, клетки и фуллереноподобные структуры. Анализ энергетических и электронных свойств (а именно, HOMO-LUMO щели) структур получены с помощью теории функционала плотности с использованием гибридного функционала B3LYP с электронными базисами Попла 6-31G (d) и Данинга aug-cc-pVTZ. Показано, что для азотных фуллеренов правило изолированных пятиугольников не выполняется. Азотные клетки, состоящие из треугольников, квадратов и пятиугольников, предложенные впервые, также оказались устойчивы.

Формула Эйлера для построения каркасов:

$$V - E + F = 2;$$

$$3t + 2s + p = 12;$$

$$t + s + p + hex = (x/2) + 2,$$

где V – число вершин, E – число ребер, F – число граней; t , s , p , hex – трех-, четырех-, пяти- и шестиугольный многогранник в каркасе, x – число атомов.

Расчет структур проводится без учета симметрии с проверкой частотных свойств. Ниже представлены некоторые базовые каркасы клеток.

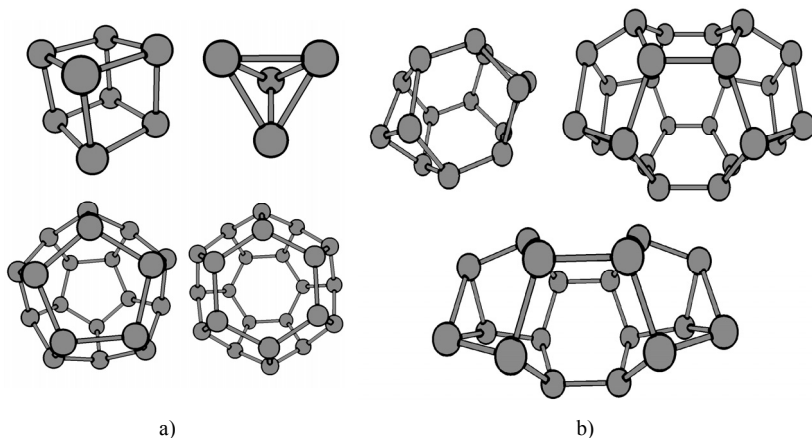


Рис. 1. Каркасы азотных клеток и фуллеренов (a); Каркасы цилиндрических фигур (b)

Каркасы цилиндрических фигур получают методом встраивания в обычную клетку гексагональных граней и получено три типа таких структур. Увеличивая число гексагональных граней увеличивает длину цилиндрической фигуры и такие каркасы сохраняют устойчивость.

В результате работы выяснилось, что с ростом числа атомов уменьшается число возможных комбинаций граней для устойчивости клеток. Максимальное число атомов в клетке не превышает 18-ти атомов, следующие каркасы имеют форму фуллерена N_{20} и N_{24} . Дальнейший рост атомов возможен только у цилиндрических фигур с увеличением гексагональных граней в структуре. Топология каркасов влияет на энергию связи и размер НОМО-LUMO щели, а различие в инфракрасном спектре позволит отличить их изомеры друг от друга.

Литература

1. M.W. Schmidt et al., J. Comput. Chem., 14, (1993).

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА ПОЛЯРОНОВ
В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

Ю.В. Метель¹, *В.Р. Никитенко¹, Я.В. Бурдаков¹

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»

(Московский инженерно-физический институт)

Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: vladronik@yandex.ru

**AN ANALYTIC MODEL OF POLARON TRANSPORT
IN DISORDERED ORGANIC MATERIALS**

Y.V. Metel¹, *V.R. Nikitenko¹, Y.V. Burdakov¹

¹National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute)

Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: vladronik@yandex.ru

The transport level in disordered organic materials is analogous to the mobility edge of the multiple trapping model. Both analytical and numerical modeling of the transport level as a whole is based on the Miller-Abraham's model for hopping rates. This paper shows that, under certain conditions, the multiple trapping model formalism can describe hopping transport using various models for hopping rates, such as the Marcus model, which takes into account the polaron effect. It was determined that both analytical and Monte-Carlo modeling of the transport level give the same temperature dependences for carrier release times, however, the preexponential factor requires additional study and refinement.

Для неупорядоченных материалов, в том числе и органических, типично квазинепрерывное распределение локализованных состояний (ЛС), широко распределенных по энергии. Особенность органических материалов состоит в том, что в них все состояния для носителей заряда локализованы, и транспорт осуществляется путем туннельных перескоков между ЛС с участием фононов (прыжковый транспорт).

Транспорт в неупорядоченных неорганических материалах, осуществляющийся путем термического освобождения носителя в зону де-локализованных состояний с последующим захватом на другую ловушку, описывается в рамках формализма модели многократного захвата (МЗ). Было показано [1–3], что концепция транспортного уровня позволяет применять сравнительно простой формализм модели МЗ и для перескоков носителей в рамках модели гауссова беспорядка [4] (без энергетических корреляций) в органических неупорядоченных материалах. Транспортный уровень при этом выступает в роли края подвижности. Дело в том, что все применяемые для органических материалов модели темпов

переходов носителей между начальным и конечным состоянием включают экспоненциальную зависимость, как от разности энергий этих состояний, так и от длины прыжка, так что темпы переходов между разными состояниями разбросаны на много порядков. Вследствие этого всегда можно выделить две фракции состояний: «ловушки» и проводящие состояния. Локализованные состояния с достаточно низкой энергией, на которых носитель долго задерживается и образует первую фракцию — «ловушки». Вторая фракция — проводящие состояния, вносит основной вклад в проводимость. Транспорт можно понимать, как процесс переноса носителей между ловушками.

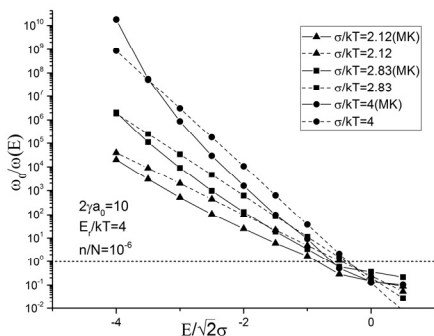


Рис. 1. Зависимость времени освобождения от энергии при различных значениях параметра беспорядка. Пунктирные линии показывают результаты аналитического моделирования, сплошные линии — результаты моделирования Монте-Карло. Горизонтальная штриховая линия показывает значение

$$\omega(E) = \omega_0 = \nu_0 \exp(-2\gamma a_0 - E_r/4kT), T = 300 \text{ K}$$

$\exp((E_c - E)/kT)$ для довольно широкого энергетического интервала, что подтверждает применимость формализма МЗ. Однако предэкспоненциальный частотный фактор требует дополнительного исследования и уточнения.

Литература

1. S.D. Baranovskii, Phys. status solidi B, **251**, 3 (2014).
2. V.I. Arkhipov et al., Phys. Rev. B, **64**, 125125 (2001).
3. V.R. Nikitenko and M.N. Strikhanov, J. Appl. Phys., **115**, 073704 (2014).
4. H. Bässler, Phys. status solidi B, **175**, 15 (1993).

В данной работе показано, что применимость формализма модели МЗ не связана с использованием определённой модели (Миллера-Абрахамса, МА) для темпов перехода между ЛС.

Проведено аналитическое моделирование положения транспортного уровня (E_c) для двух известных моделей — Маркуса и МА. Как аналитическое, так и моделирование методом Монте-Карло показало, что времена освобождения носителя зависят от энергии начального состояния E по экспоненциальному закону

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КРЕМНИЕВЫХ ПОЛИПРИЗМАНОВ**

****М.А. Гимальдинова¹, К.П. Катин¹, К.С. Гришаков¹, М.М. Маслов¹, Р.В. Рыжук¹,
Н.И. Каргин¹***

¹Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31,
e-mail: margaritagimaldinova@gmail.com

ENERGY AND ELECTRONIC CHARACTERISTICS OF SILICON POLYPRISMANES

****M.A. Gimaldinova¹, K.P. Katin¹, K.S. Grishakov¹, M.M. Maslov¹, R.V. Ryzhuk¹, N.I. Kargin¹***

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: margaritagimaldinova@gmail.com

We report structural, energetic and some electronic properties of $[n,5]$ -, $[n,6]$ -, $[n,7]$ - and $[n,8]$ silaprismanes (polysilaprismanes), i.e. silicon nanotubes of a special type constructed from dehydrogenated molecules of cyclosilanes (silicon rings) Si_5 -, Si_6 -, Si_7 -, and Si_8 , respectively. Binding energies, interatomic bonds, and the energy gaps between the highest and lowest occupied molecular orbitals (HOMO and LUMO, respectively) have been calculated using the density functional theory with B3LYP functional with the 6-311G(d,p) electron basis set for the systems up to ten layers. It is found that in the bulk limit ($n \rightarrow \infty$) the silaprismanes conserve their highly strained framework and become more thermodynamically stable as the number of layers n increases. Moreover, the HOMO-LUMO gap analysis reveals that the silaprismanes with the large effective length can be referred to semimetals or even the conductors.

В настоящей работе были изучены кремниевые $[n,m]$ призмы (или полисилапризмы), которые представляют собой кремниевые нанотрубки особого типа, построенные из кремниевых колец, где m - число вершин замкнутого кольца, а n - количество колец, соединенных между собой (рис. 1).

Расчеты структурных, энергетических и электронных характеристик проводились с помощью программного комплекса TeraChem [1] в рамках теории функционала плотности (DFT) с функционалом B3LYP и базисом 6-311G(d,p).

Для рассматриваемых систем была определена энергия связи:

$$E_b = \frac{1}{N_{at}} \{kE(H) + lE(Si) - E_{tot}(SPP)\},$$

где $N_{at} = k + l$ – полное число атомов, $E_{tot}(SPP)$ – полная энергия полипризмана, $E(H)$, $E(Si)$ – энергии изолированных атомов водорода и кремния, соответственно. Было установлено, что энергия связи возрастает с ростом числа колец в полипризмানে, таким образом, система становится более термодинамически устойчивой.

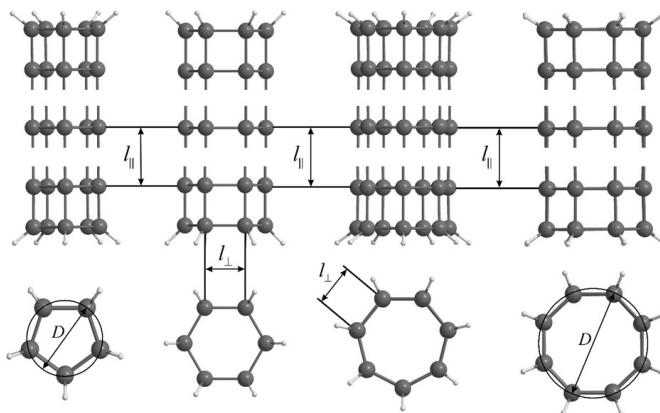


Рис. 1. Молекулярная структура $[n,5]$ -, $[n,6]$ -, $[n,7]$ - и $[n,8]$ силапризманов. Вид в двух проекциях (сбоку и сверху). Символы $l_{||}$ и $l_{\perp}$ соответствуют межслойным и внутрислойным Si-Si связям, соответственно, D – эффективный диаметр кольца

НОМО-LUMO щель определяется как энергетический зазор между высшей занятой (НОМО) и нижней свободной молекулярными орбиталями (LUMO):

$$\Delta_{HL} = \varepsilon_L - \varepsilon_H.$$

НОМО-LUMO щель убывает с ростом числа колец, более того, анализ НОМО-LUMO щелей показывает, что силапризманы с большой эффективной длиной можно отнести к полуметаллам или даже к проводникам.

Литература

1. I.S. Ufimtsev, T.J. Martínez, J. Chem. Theory Comput., **5**, 2619 (2009).

**ТРАНСПОРТ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ
ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ С ПРИМЕСЯМИ**

****В.Р. Никитенко¹, М.М. Амракулов¹***

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

**CHARGE CARRIERS TRANSPORT IN DISORDERED ORGANIC MATERIALS
WITH IMPURITIES**

****V.R. Nikitenko¹, M.M. Amrakuov¹***

¹National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe highway, 31, e-mail: vladronik@yandex.ru

Analytic expressions for charge carrier density and transient current for the conditions of time-of-flight experiment have been founded in nonequilibrium transport regime. The dependence of the shape of the transient current on the concentration of deep states, as well as on the sample thickness, has been analyzed. The results obtained were compared with the experimental data.

В последние годы неупорядоченные органические полупроводники интенсивно исследуются в связи с многочисленными применениями в электронике [1]. Транспорт носителей заряда является одним из ключевых для работы электронных устройств физических процессов, поэтому разработка теоретических моделей переноса актуальна. Для экспериментального определения подвижности широко применяется времяпролётная методика (ВПМ) [2, 3]. Измеряемая величина – переходный ток, вызванный дрейфом узкого пакета импульсно фотоинжектированных носителей заряда, в структуре типа «сэндвич», которая включает слой исследуемого материала, с толщиной L обычно от 1 до 20 мкм, и два электрода, на которые подается постоянное напряжение. Дрейфовую подвижность μ определяют из времени пролёта, $\mu = L/F_0 t_{tr}$. Транспорт носителей заряда является прыжковым, т.е. происходит путём туннельных перескоков между локализованными состояниями (ЛС) с участием фононов. Распределение ЛС по энергии описывается обычно гауссовой функцией [3].

Начальное энергетическое распределение фотогенерированных носителей обычно является сильно неравновесным, соответственно транспорт на начальном интервале времени – дисперсионный, так что дрейфовая подвижность является характеристикой материала, а не слоя, если время пролёта меньше, чем время установления квазиравновесия.

Если исследуемый материал содержит примеси, связанные с ними ЛС, описываются второй гауссовой функцией, сдвинутой вниз по энергии. В работе применена концепция транспортного уровня и исследована ее применимость в условиях немонотонного распределения состояний. Данная концепция позволяет дать описание прыжкового транспорта, используя сравнительно простой и хорошо разработанный формализм модели многократного захвата [4]. Транспортный уровень – аналог края подвижности, а нижележащие локализованные состояния – как ловушки. Аналитически решено уравнение для пространственно-неоднородной концентрации носителей [4], получены аналитические выражения для переходного тока. Проведен анализ зависимости формы кривой от кон-

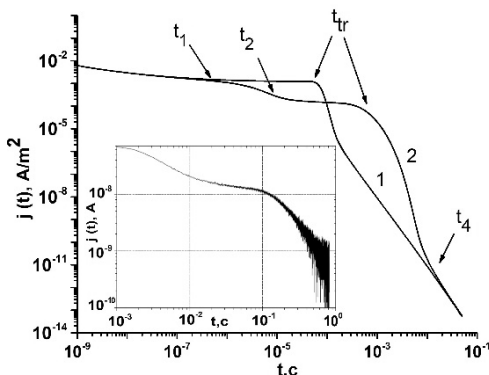


Рис. 1. Кривые переходного тока: 1 – без учета глубоких ловушечных состояний, 2 – с учетом данных состояний. На вставке показан сигнал переходного фото-тока, полученный экспериментально в работе [5]

центрации глубоких состояний, а также от толщины образца. Полученные результаты сравнили с результатами переходного тока без учета примесных состояний. Установлены характерные времена (t_1, t_2, t_{tr}, t_4) переходного тока, см. рис. 1. Рис. 1 показывает, что теоретическая кривая качественно согласуется с экспериментальными результатами [5].

Литература

1. H. Sirringhaus, Adv. Mater., **26**, 1319-1334 (2014).
2. P.M. Borsenberger, D.S. Weiss, Organic photoreceptors for xerography (Boca Raton, CRC Press, 1998).
3. H. Bässler, Phys. Status Solidi B, **175**, 15 (1993).
4. V.R. Nikitenko, H. von Seggern, H. Bässler. J. Phys.: Condens. Matter., **19**, 136210 (2007).
5. M.A. Parshin, J. Ollevier, M. Van der Auweraer, Proc. SPIE 6192, Organic Optoelectronics and Photonics II, 61922A (2006).

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ФУЛЛЕРЕНОВ, ДОПИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ**

****М.А. Салем^{1,2}, К.П. Катин¹, М.М. Маслов¹***

¹Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31,

²Университет Загазиг, 44519 Загазиг, Египет

e-mail: mahmod_ali735@yahoo.com

**THEORETICAL STUDY OF THE ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES OF
SILICON DOPED FULLERENES**

****M.A. Salem^{1,2}, K.P. Katin¹, M.M. Maslov¹***

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31,

²Department of Physics, Faculty of Science, Zagazig University, 44519 Zagazig, Egypt

e-mail: mahmod_ali735@yahoo.com

Structural, electronic, and optical properties of silicon doped carbon fullerenes C_n with different sizes ($n = 20, 36, 60$) are investigated. We have calculated the binding energies, and the energy gaps between the highest occupied and lowest unoccupied molecular orbitals (HOMO and LUMO, respectively) using the density functional theory with B3LYP functional with the 6-311G(d) electron basis set. It is found that the electronic properties change according to the fullerene size and to the number of doped silicon atoms introduced to the fullerene cages. According to our results, the HOMO-LUMO gaps of all three cages demonstrate different trends after their doping of silicon atoms. Moreover, the HOMO-LUMO gap analysis reveals that the fullerene C_{36} has the smallest value between all studied cages.

В этой работе мы выполнили квантово-химические вычисления в рамках теории функционала электронной плотности, чтобы исследовать, как легирование кремнием влияет на электронные и оптические свойства углеродных фуллеренов. Наряду с C_{60} , мы рассмотрели наиболее распространенные малые фуллерены C_{20} и C_{36} , выделенные экспериментально в начале 2000-х годов. Таким образом, нами исследовались кластеры C_n , где $n = 20, 36$ и 60 .

Расчеты структурных, энергетических и электронных характеристик проводились с помощью программного комплекса GAMESS в рамках теории функционала электронной плотности с гибридным функционалом B3LYP [1] и электронным базисом 6-311G(d) [2].

НОМО-LUMO щель определялась как энергетический зазор между высшей занятой (НОМО) и нижней свободной молекулярными орбиталями (LUMO):

$$E_g = E_{\text{НОМО}} - E_{\text{LUMO}}$$

Таблица 1

Энергии связи E_b (эВ), энергии НОМО (эВ) и LUMO орбиталей (эВ) и НОМО-LUMO щель E_g (эВ) допированных кремнием фуллеренов

фуллерен	E_b	$E_{\text{НОМО}}$	E_{LUMO}	E_g
C₂₀				
C ₂₀	6.10	-5.34	-3.40	1.93
C ₁₉ Si	5.99	-5.77	-3.52	2.24
C ₁₈ Si ₂	5.85	-6.05	-4.06	1.99
C₃₆				
C ₃₆	6.59	-5.47	-4.34	1.13
C ₃₅ Si	6.47	-5.39	-4.28	1.11
C ₃₄ Si ₂	6.37	-5.25	-4.09	1.15
C₆₀				
C ₆₀	6.92	-6.28	-3.55	2.74
C ₅₉ Si	6.83	-6.06	-3.91	2.15
C ₅₈ Si ₂	6.76	-5.86	-4.05	1.81

Согласно нашим результатам, допирование кремнием по-разному влияет на величину НОМО-LUMO щели в фуллеренах разного размера. Более того, анализ НОМО-LUMO щелей показывает, что фуллерен C₃₆ имеет наименьшее значение щели среди всех исследованных клеток. Согласно таблице 1, энергия связи системы падает при росте числа допирующих атомов кремния, что согласуется с предыдущими работами [3].

Чтобы лучше понять изменения электронных свойств фуллеренов под действием допирования, мы рассчитали плотность электронных состояний в них до и после замещения атомов углерода. Были выделены состояния, связанные с кремниевой примесью. Мы считаем, что полученные результаты помогут, управляемо варьировать ширину энергетической щели в фуллеренах, что необходимо для их применения в устройствах наноэлектроники, фотовольтаики и солнечной энергетики. Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МК-4040.2018.2.

Литература

1. C. Lee, W. Yang and R.G. Parr, Phys. Rev. B, 37, 785-789 (1988).
2. J.E. Del Bene, D.H. Aue and I. Shavitt, J. of the American Chem. Soc., 114, 1631 (1992).
3. M.R. Momeni and F.A. Shakib, Chem. Phys. Lett., 492, 137-141 (2010).

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Ю.А. Концевой, *В.И. Корнеев, Б.К. Медведев

АО «НПП «Пульсар»

Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, дом 27, e-mail: korneev_vi@pulsarnpp.ru

QUALITY CONTROL METHODS OF DIELECTRIC FILMS

Yu.A. Kontsevov, *V.I. Korneev, B.K. Medvedev

J&C «S&PE «Pulsar»

Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27, e-mail: korneev_vi@pulsarnpp.ru

The presented report describes two methods for monitoring defects in dielectric films such as SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , and others. The first method is based on measuring the current-voltage characteristic of the metal-dielectric-electrolyte-metal system. The second method is based on the use of a tunnel microscope, the current of which depends on the quality of the controlled dielectric film.

Определение пористости пленки нитрида кремния в работе [1] оценивалось электрографическим методом. Между двумя графитовыми электродами помещалась исследуемая пластина, на лицевой поверхности которой располагалась фотобумага, выдержанная в проявителе несколько минут. На электроды подавалось постоянное напряжение в 30÷40 В при токе 20 мА. После экспонирования образца на фотобумаге закреплялось изображение и контролировалось количество дефектов. Для пленки нитрида кремния пористость считается удовлетворительной при количестве дефектов не более 2 см^{-2} . Однако этот давно применяющийся метод [2] не позволяет определять действительный размер дефектов в слое нитрида кремния, т.е. размер тех отверстий, которые фиксируются в виде отпечатков на фотобумаге.

В представленном докладе приведено описание метода контроля дефектов в диэлектрических пленках типа SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 и других.

Метод основан на измерении ВАХ системы «металл-диэлектрик-электролит-металл». Особенностью метода является конструкция, в которой четко выдерживается площадь контакта «электролит-диэлектрик». Конструкция устройства будет приведена в докладе. Критерием качества диэлектрической пленки является напряжение, при котором возникает протекание тока и величина самого тока при заданном напряжении. При наличии сквозных дефектов в пленке диэлектрика при площади контролируемого контакта «диэлектрик-электролит», равной 1 см^2 сквозной ток при положительном напряжении на металлическом электроде, контакти-

рующем с электролитом ниже пробивного напряжения, может составлять десятки миллиампер.

В качестве примера на рисунке 1 приведена вольтамперная характеристика системы «платина-электролит-пленка Si_3N_4 толщиной 35нм».

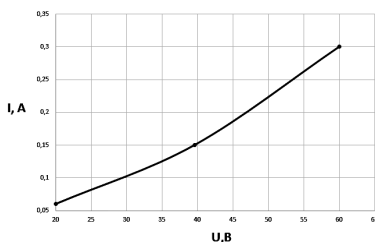


Рис. 1. Вольтамперная характеристика системы «платина-электролит-пленка Si_3N_4 толщиной 35нм» построенная по трем точкам

Второй метод основан на использовании туннельного микроскопа, ток которого зависит от качества контролируемой диэлектрической пленки. Здесь площадь контролируемого участка значительно меньше, и составляет обычно менее $0,1 \text{ мкм}^2$, но разрешающая способность на несколько порядков величины выше, чем для первого метода. Панорама утечек для контролируемого участка изображается в условном цвете или в черном цвете разной интенсивности.

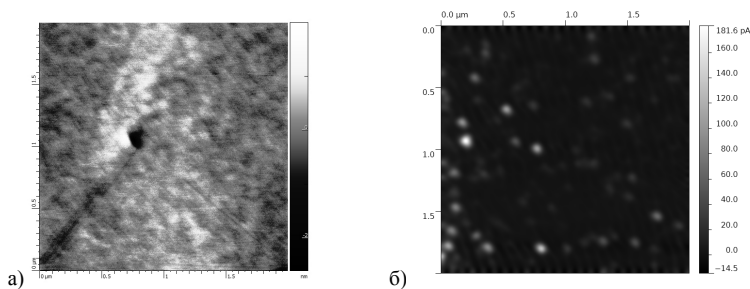


Рис. 2. Топография пленки Al_2O_3 (а). Распределение тока по той же поверхности. Светлые области – большой ток (б)

Литература

1. А.Е. Ануров, А.А. Данилов, А.А. Жуков, (Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC, часть 2, МИРЭА, г. МОСКВА) 73-77 (2011).
2. Ю.А. Концевой, Д.К. Филатов, (Дефекты кремниевых структур и приборов. Часть 2, М: ЦНИИ "Электроника") 68 с. (1987).

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ СОСТАВА И ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ AlGaAs ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ

****П.Л. Доброхотов¹, И.С. Васильевский¹, А.Н. Виниченко¹, В.В. Сарайкин², С.С. Пушкарёв²***

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова
Российской академии наук, Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7/5

DEVELOPMENT OF HIGH RESOLUTION X-RAY DIFFRACTION TECHNIQUE FOR LAYER COMPOSITION AND THICKNESS CALIBRATION OF AlGaAs EPITAXIAL STRUCTURES

****P.L. Dobrokhotov¹, I.S. Vasil'evskii¹, A.N. Vinichenko¹, V.V. Sarayikin², S.S. Pushkarev²***

¹National Research Nuclear University MEPHI,

Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, 115409, e-mail: PLDobrokhotov@mephi.ru

²V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Science, Russia, 117105 Moscow, Nagorny proezd, 7/5

Composition and thickness determination of epitaxial $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructures layers with the use of high-resolution x-ray diffraction (HRXRD) technique was conducted. Lattice parameters and elastic constants of 300 nm thick AlAs layer grown on GaAs substrate were measured in order to refine database values. Composition x of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layer was calculated and compared with other investigation methods. It was revealed that content determination accuracy does not exceed $\delta = \pm 0,04$. Also $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ superlattice was used to determine growth speed of AlAs and GaAs. Working quantum cascade laser was produced based on calibration performed.

Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия (HRXRD) на данный момент является одним из основных методов, позволяющих с высокой точностью измерять структурные параметры эпитаксиальных монокристаллических пленок. Основным инструментом анализа при использовании HRXRD является построение модели экспериментально полученной кривой дифракционного отражения (КДО) с использованием обобщенной теории дифракции Такаги-Топэна [1]. Уточняемыми параметрами в этой модели являются толщины эпитаксиальных слоев и мольная доля компонент. Однако материальные параметры AlAs в различных базах данных разнятся, что влияет на точность решения обратной задачи при анализе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ гетероструктур. Уточнение этих параметров было целью настоящей работы.

Базовая проверка фундаментальных констант проводилось на образце, в котором эпитаксиальный слой AlAs толщиной 300 нм выращен методом МЛЭ на подложке GaAs (001) без разориентации. Для измерений HRXRD использовался рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV с приставкой для съемки тонких пленок. Толщина слоя AlAs позволила надежно зафиксировать толщинные осцилляции. Моделирование КДО проводилось в программе GlobalFit со встроенной базой данных соединений и элементов.

С использованием стандартной обработки дифракционных максимумов (рис. 1), карт обратного рассеяния и моделирования обнаружено, что слой является псевдоморфным, удалось добиться уточнения параметра решетки слоя AlAs и провести проверку предлагаемых в литературе значений упругих констант [2].

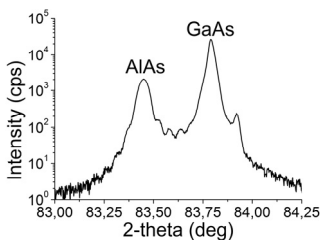


Рис. 1. Кривая дифракционного отражения в окрестности максимума (004) подложки GaAs и эпитаксиального слоя AlAs

позволяет уточнить мольную долю AlAs в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с точностью до $\delta = \pm 0,04$.

Для калибровки скоростей роста в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии проведено исследование сверхрешетки $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$, выращенной на подложке из GaAs. Показано, что наибольший вклад в разброс уточняемых значений скоростей роста AlAs и GaAs вносит изменение толщин периода сверхрешетки. Оценены отличия скорости роста при МЛЭ толстых ($\sim 300\text{--}1000$ нм) слоев и тонких ($\sim 3\text{--}15$ нм) слоев.

На основании проведенных калибровок изготовлена рабочая структура квантово-каскадного лазера на длину волны 100 мкм.

Литература

1. Д.К. Боуэн, Б.К. Таннер, (Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография, СПб.: Наука) 274 с. (2002).
2. S. Gehrsitz et al., Phys. Rev. B, 60(16), 11601–11609 (1999).

**УСИЛЕНИЕ «ЖЁЛТОЙ» КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ GaN-СТРУКТУРЫ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**

****С.С. Пушкарёв¹, В.Б. Копылов¹, В.В. Сарайкин¹***

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова
Российской академии наук. Нагорный проезд, 7/5, 117105, Москва, e-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

**ENHANCING OF GaN-BASED HETEROSTRUCTURE "YELLOW"
CATHODOLUMINESCENCE DUE TO LOW-ENERGY ELECTRON BEAM EXPOSURE**

****S.S. Pushkarev¹, V.B. Kopylov¹, V.V. Saraykin¹***

¹V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy
of Sciences. Nagornyi proezd, 7/5, 117105, Moscow, e-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

Enhancing of "yellow" cathodoluminescence of GaN-based heterostructure exposed to 9 keV electron beam for a few hours is found out. Probably, degradation of the crystal structure occurs under the impact of electrons. It was previously believed that the degradation of GaN is either caused by electrons with much higher energy (more than 1 MeV) or is completely absent.

«Жёлтая» люминесценция гетероструктур на основе GaN (широкий пик в спектре в области 1.5–2.5 эВ с максимумом вблизи 2.2 эВ) свидетельствует о большой концентрации дефектов. Дефектами, приводящими к появлению «жёлтой» люминесценции, являются вакансии Ga, примесные атомы C, Fe и комплексы $V_{\text{Ga}}-\text{O}_\text{N}$ (вакансия галлия – атом O в узле N) [1]. Поскольку вакансии Ga и их комплексы реагируют на поля деформаций, образующиеся вокруг прорастающих дислокаций и дефектов упаковки, и вследствие этого захватываются ими [1, 2], то исследование «жёлтой» люминесценции позволяет анализировать не только точечные, но и протяжённые дефекты кристаллической структуры нитридных плёнок. Стоит отметить, что «жёлтая» люминесценция одинаково хорошо наблюдается при охлаждении образца и при комнатной температуре, что значительно облегчает её детектирование [2]. Наличие интенсивной «жёлтой» фотолюминесценции непосредственно связано с уменьшением надёжности [3] и быстродействия [4] СВЧ-транзисторов на структурах GaN/AlGaIn.

В данной работе измерения спектров катодолуминесценции структуры GaN/AlGaIn выполнялись следующим образом. Образец, находящийся в вакуумной камере установки вторично-ионной масс-спектрометрии IMS 4f фирмы CAMECA, облучался пучком электронов с энергией 9 кэВ, сфокусированным в пятно диаметром ~ 500 мкм. Люминесцентное излучение образца фокусировалось объективом, вводилось в оптоволокно и

передавалось в монохроматор МДР-23У, на выходе которого попадало в охлаждаемый жидким азотом ФЭУ-62 и регистрировалось счётчиком фотонов.

При измерении спектров катодолюминесценции было обнаружено, что интенсивность «жёлтой» люминесценции I_{YPL} значительно увеличивается по мере накопления образцом дозы облучения Q (рис. 1). Зависимость $I_{YPL}(Q)$, измеренная на нескольких участках образца, во всех случаях имела сложный вид: участок начального роста и участок выхода на насыщение. Полное время облучения образца – 1.5 часа.

Очевидно, происходит деградация кристаллической структуры под действием электронов. Предполагается, что электроны с энергией 9 кэВ проникают на глубину порядка 1 мкм. Ранее считалось, что деградация GaN либо вызывается электронами с гораздо большей энергией (более 1 МэВ) [1, стр. 23], либо вообще отсутствует, а вместо этого происходит улучшение: так, авторы [5] сообщают о снижении интенсивности «жёлтой» катодолюминесценции при увеличении дозы облучения структур электронами.

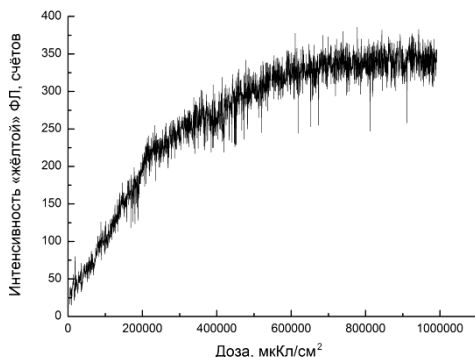


Рис.1. Усиление жёлтой катодолюминесценции структуры на основе GaN под действием пучка электронов с энергией 9 кэВ, длина волны 5897 Å

Литература

1. Michael A. Reshchikov, Hadis Morkoç, J. Appl. Phys., **97**, 061301 (2005).
2. M. Matys, B. Adamowicz, J. Appl. Phys., **121**, 065104 (2017).
3. T. Kikkawa, K. Makiyama, T. Ohki, et al., Phys. Stat. Solidi A, **206**(6), 1135–1144 (2009).
4. K. Saarinen, T. Laine, S. Kuisma, et al., Phys. Rev. Lett., **79**, 3030–3033 (1997).
5. S. Suihkonen, H. Nykanen, et al., Physica Status Solidi A, **210**(2), 383–385 (2013).

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАМЕЩЕННЫХ
ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВЫХ ПЕРОВСКИТОВ**

Л.С. Хорошко¹

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

**STRUCTURAL RESEARCH OF SUBSTITUTED YTTRIUM-ALUMINUM
PEROVSKITES**

L.S. Khoroshko¹

¹Belarusian state university of informatics and radioelectronics,
Republic of Belarus, 220013, P. Browka str., 6, e-mail: L_Khoroshko@bsuir.by

Yttrium-aluminium and Nd-doped perovskites are promising materials with a rather wide range of possible applications, such as conversion of radiation, scintillators and radiation detectors, materials for radiological medicine and bioimaging. In this paper structural research of Nd substituted cubic $YAlO_3$ by the *ab initio* methods are presented. Cubic $YAlO_3$ with partial and full substitution of Y by Nd is indirect-gap semiconductor with the band gap about 3 eV. Lattice parameter is changing from 3,715 Å for $YAlO_3$ to 3,782 Å for $NdAlO_3$ with saving of cubic syngony.

Иттрий-алюминиевые перовскиты (ИАП) – перспективные материалы с достаточно широкой сферой возможного применения. Легированные лантаноидами ИАП могут использоваться для конверсии излучений, сцинтилляторов и радиационных детекторов, в радиологической медицине, для биоимиджинга. Интересны также магнитные свойства ряда лантаноидов, позволяющие использовать соединения Nd и Sm в фильтрации топлива, магниторезонансной томографии, генераторах с магнитным возбуждением, композитов для остекловывания радиоактивных отходов.

При легировании неодимом соединения $YAlO_3$ иттрий в кристаллической решетке может быть частично или полностью замещен неодимом с сохранением кристаллической структуры перовскита гексагональной, орторомбической и ромбоэдрической сингоний [1]. Однако, неодимовый алюминиевый перовскит $NdAlO_3$ с кубической сингонией является материалом, исследования электронной структуры и свойств которого *ab initio* методами достаточно мало освещены в научно-технической литературе. В данной работе приводится сравнительное исследование свойств перовскита $Y_xNd_{1-x}AlO_3$, где x изменяется в диапазоне от 0 до 1.

Моделирование исходной и замещенных решеток ИАП проводили в пакете *Open source package for Material eXplorer* [2–5], реализующем ме-

тод псевдопотенциала в рамках теории функционала электронной плотности. Энергию отсечки выбирали равной 2 кэВ, критерий сходимости расчета самосогласованного поля составлял 10^{-6} эВ/атом, оптимизацию элементарной ячейки с изменяемым объемом продолжали до тех пор, пока силы, действующие на атомы, не становились менее $2,5 \cdot 10^{-4}$ эВ/Å.

Анализ полученных данных показывает, что частичное и полное замещение атомов иттрия атомами неодима в кристаллической решетке кубического перовскита YAlO_3 с параметром 3,715 Å приводит к формированию перовскита NdAlO_3 с сохранением исходной сингонии и увеличением параметр решетки до 3,782 Å (рис. 1).

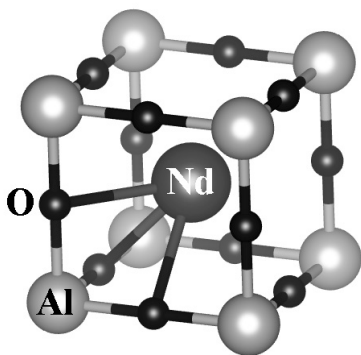


Рис. 1. Фрагмент кристаллической решетки NdAlO_3

Анализ зонной структуры показывает, что материалы $\text{Y}_x\text{Nd}_{1-x}\text{AlO}_3$ являются непрямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны ≈ 3 эВ, независимо от степени легирования, а также при полном замещении иттрия неодимом. Сохранение полупроводниковых свойств и дисперсии зон при сильной степени легирования интересно с точки зрения создания светоизлучающих материалов с эффектом нивелирования концентрационного тушения люми-

несценции лантаноида, а также ввиду наличия у неодима магнитных свойств, делающих такие соединения перспективными для создания высокотемпературных сверхпроводящих материалов.

Автор выражает благодарность А. Баглову за помощь в проведении расчетов.

Литература

1. H. Lehnert, H. Boysen, P. Dreier, Y.Yu. Zeitschrift für Kristallographie-Cryst. Mater., 215, 145 (2000).
2. T. Ozaki, Phys. Rev. B, **67**, 155108 (2003).
3. T. Ozaki, Phys. Rev. B, **69**, 195113 (2004).
4. T. Ozaki and H. Kino, Phys. Rev. B, **72**, 045121 (2005).
5. K. Lejaeghere, Science **351**(6280), aad3000 (2016).

**РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НЕСООТВЕТСТВИЯ
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ 3C-SiC/Si**

****А.О. Султанов¹, А.С. Гусев¹, Н.В. Сиглова¹, Н.И. Каргин¹, Г.К. Сафаралиев¹,
С.М. Рындя¹, Р.В. Рыжук¹***

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

RELAXATION OF MISMATCH STRESSES IN THE HETEROSTRUCTURE 3C-SiC/Si

****A.O. Sultanov¹, A.S. Gusev¹, N.V. Siglovaya¹, N.I. Kargin¹, G.K. Safaraliev¹,
S.M. Ryndya¹, R.V. Ryzhuk¹***

¹National Research Nuclear University «MEPHI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: info@mephi.ru

In this paper, the effect of the buffer layer on the relaxation of elastic stresses in 3C-SiC/Si heterostructures is studied, including analytical dependences reflecting the influence of the buffer layer thickness and porosity factors on the distribution of mechanical stresses and strains in the 3C-SiC/por-Si system.

В настоящей работе изучено влияние буферного слоя на релаксацию упругих напряжений в гетероструктурах 3C-SiC/Si, в том числе, получены аналитические зависимости, отражающие влияние факторов толщины и пористости буферного слоя на распределение механических напряжений и деформаций в системе 3C-SiC/por-Si.

В процессе эпитаксии кубического карбида кремния на подложках кремния, по причине несоответствия по параметрам кристаллических решеток и коэффициентов теплового расширения, пленка 3C-SiC подвергается деформации растяжения, которая приводит к образованию дислокаций несоответствия, в свою очередь снижающих кристаллическое качество синтезируемых пленок карбида кремния. Применение буферных пористых слоев при гетероэпитаксии полупроводниковых материалов приводит к уменьшению напряжений несоответствия и улучшению кристаллического совершенства выращиваемых слоев [1]. В настоящей работе приведено сравнение расчетных значений напряжений несоответствия структур 3C-SiC/Si и 3C-SiC/por-Si.

Распределения механических напряжений в структурах 3C-SiC/Si и 3C-SiC/por-Si получены использованием модели, предложенной в [2].

Построены эпюры внутренних напряжений структур 3C-SiC/Si и 3C-SiC/por-Si для значения толщины слоя 3C-SiC $h = 300$ нм. Вид эпюр приведен на рис. 1. Значение пористости буферного слоя $\Pi = 0,4$. Выбор зна-

чения $\Pi = 0,4$ определяется ожиданием уменьшения механических напряжений в ϵ раз.

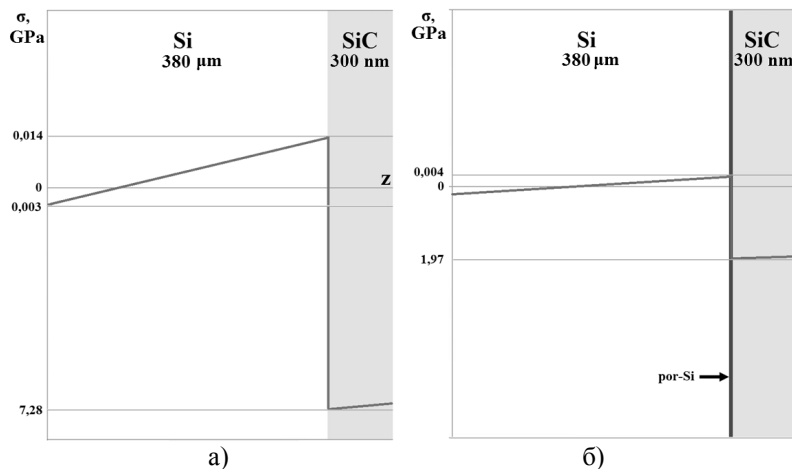


Рис. 1. Эпюры напряжений несоответствия: а) в объеме гетероструктуры 3C-SiC/Si; б) в объеме гетероструктуры 3C-SiC/Si с применением буферного слоя пористого кремния

Приведенные эпюры, в рамках предложенной модели, позволяют сделать вывод, что применение пористого кремния как буферного слоя для эпитаксии пленок 3C-SiC на подложках кремния приводит к существенному уменьшению (от 7,28 до 1,97 ГПа) внутренних напряжений гетероструктур. Следует заметить, что рассчитанные значения напряжений значительно меньше предела упругости монокристаллического карбида кремния $\sigma_{\text{уп}} = 21$ ГПа [3].

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования НИЯУ МИФИ «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников».

Литература

1. Р.С. Телятник и др., ФТП, 57(1), 153 (2015).
2. G.H. Olsen, J. Appl. Phys., 48, 2543–2547 (1977).
3. C.M. Su et al., J. of Appl. Phys., 77, 1280–1283 (1995).

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ В ТЕРМОМИГРАЦИОННЫХ КАНАЛАХ КРЕМНИЯ

**Б.М. Середин¹, А.Н. Заиченко¹, С.Г. Симакин², А.А. Ломов³*

¹Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова
Россия, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, дом 132, e-mail: seredinboris@gmail.com

²Ярославский филиал Физико-технологического института имени К.А. Валиева РАН
Россия, 150007, г. Ярославль, ул. Университетская, дом 21, e-mail: simser@mail.ru

³Физико-технологический институт имени К.А. Валиева РАН
Россия, 117282, г. Москва, Нахимовский проспект, дом 36/1, e-mail: lomov@ftian.ru

PECULIARITIES OF DETERMINATION OF THE ALUMINUM CONCENTRATION IN SILICON THERMOMIGRATION CHANNELS BY X-RAY DIFFRACTION

**B.M. Seredin¹, A.N. Zaichenko¹, S.G. Simakin², A.A. Lomov³*

¹Platov South-Russian State Polytechnic University
Russia, 123456 Novocherkassk, str. Prosveshcheniya 132, e-mail: seredinboris@gmail.com

²Valiev Institute of Physics and Technology of RAS, Yaroslavl Branch
Russia, 150007 Yaroslavl, Marks prospect 21, e-mail: seredinboris@gmail.com

³Valiev Institute of Physics and Technology of RAS
Russia, 117282 Moscow, Nahimovskii prospect 36/1, e-mail: lomov@ftian.ru

For the first time, the possibility of structural characterization of vertical TM silicon channels by the method of multi-axis X-ray diffractometry was shown and the aluminum concentration $((0,9-1,05) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3})$ was determined on both sides of the channel. The concentration of Al is confirmed by the data of secondary ion mass spectrometry (SIMS). The data obtained suggest that aluminum atoms are in the substitution position.

В последние годы возрос интерес к созданию в монокристаллических *n*-Si подложках вертикальных сквозных p^+ -каналов размером в десятки микрон. Такие каналы востребованы в силовой электронике, фотонике, биологических сенсорах, приборах микромеханики.

Перспективным методом создания p^+ -каналов является метод зонной перекристаллизации градиентом температуры или метод термомиграции (ТМ) [1]. Электрофизические свойства формируемых ТМ гетероструктур в значительной степени определяются напряжениями и структурными дефектами на их границах. С целью уменьшения деформации в ТМ каналах кремния используют Al, Ga или их смеси с Sn. Исследование структурного совершенства ТМ каналов и оценка концентрации легирующей примеси могут быть выполнены методом многоосевой рентгеновской дифрактометрии. Однако вертикальное расположение, конфигурация и размеры ТМ каналов затрудняют проведение структурных исследований и создают ряд проблем с их интерпретацией. На рисунке 1 показаны

двухкристальные кривые дифракционного отражения (КДО) вблизи границы ТМ каналов Si (Al), сформированных на подложках *n*-Si (111) (КЭФ - 4,5) толщиной 400 мкм при $T = 1100$ °C в течение 50 мин.

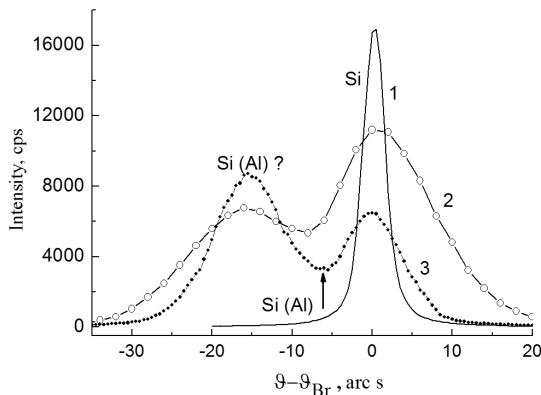


Рис. 1. КДО от образца Si с ТМ каналами Si (Al): вдали от канала (333 отражение) (1) и на границе канала (111 (2) и 333 (3) отражение). Стрелка показывает рассеяние от канала. Si K_{α} излучение, сечение рентгеновского луча равно 60 мкм

В работе впервые показана возможность структурной характеристики вертикальных ТМ каналов кремния методом двух- и трехкристальной рентгеновской дифрактометрии и определена на обоих сторонах канала концентрация алюминия $(0,9-1,05) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Величина концентрации Al подтверждена вторично ионной масс-спектрометрией (ВИМС) и электронной микроскопией (EDS). Полученные данные позволяют утверждать, что атомы алюминия находятся в позиции замещения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН имени К.А. Валиева РАН по теме № 0066-2019-0004 и частично поддержана РФФИ, грант № 19-07-00306.

Литература

1. В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, В.П. Попов, (Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов, М.: Металлургия) 232 с. (1987).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ
ОПТИЧЕСКОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ПУЧКОМ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ
И УСКОРЕННЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ**

****А.Д. Бакун¹, А.С. Гусев¹, Н.И. Каргин¹, С.М. Рындя¹, Н.В. Сиглова¹***

¹Институт функциональной ядерной электроники НИЯУ МИФИ
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31, e-mail: exp.phys.lab@gmail.com

**STUDY CHARACTERISTICS OF SURFACE PROCESSING OF OPTICAL GLASS
CERAMICS WITH A GAS CLUSTER IONS BEAM
AND ACCELERATED NEUTRAL ATOMS**

****A.D. Bakun¹, A.S. Gusev¹, N.I. Kargin¹, S.M. Ryndya¹, N.V. Siglovaya¹***

¹Institute of functional nuclear electronics NRNU MEPhI
115409, Moscow, Kashirskoye shosse 31, e-mail exp.phys.lab@gmail.com

Processes using accelerated gas cluster ions and accelerated neutral atoms are actively used for surface planarization of various materials used in electronics and optics. Using the technology of sequential processing GCIB and ANAB it is possible to obtain super-smooth surfaces with a roughness of about 0.2 nm. The features of the study of super-smooth substrates by AFM are shown. The change of roughness parameters from the type of treatment is investigated.

В настоящее время ситаллы активно применяются для изготовления оптических приборов, однако классические методы планаризации, в том числе ионная полировка не позволяют создавать зеркала со сверхслабым рассеянием для прецизионных устройств [1]. Использование в качестве метода обработки бомбардировку пучком ускоренных кластерных ионов и нейтральных атомов возможно создать сверхгладкие поверхности с шероховатостью порядка 0.1 нм, что лучше результатов ионно-лучевой полировки на 10% [2, 3].

В работе обработка поверхности полированного ситалла СО-115М производилась кластерными ионами и ускоренными нейтральными атомами Ar на установке Exogenesis nAccel 100. Расход аргона составил 200 ст. куб. см, ускоряющее напряжение изменялось в пределах от 10 до 30 кВ. В работе анализировалось влияние типа обработки, а также технологических параметров процесса на параметры шероховатости поверхности (R_a , R_{rms}), а также на количество и тип дефектов, наблюдаемых на поверхности.

Исследование поверхности проводилось на атомно-силовом микроскопе NT-MDT Solver Open. Сканирования выполнялись в полуконтактном режиме с использованием кантилевера HA_HR (A). На поверхности

исследовалась зона 20×20 мкм с разрешением 1024×1024 точки при скорости сканирования 0.2 Гц.

Исходная поверхность образцов ситалла включает дефекты разного происхождения, характеризующиеся разными пространственными масштабами:

- следы механохимического воздействия в виде анизотропных линейно структурированных особенностей, оставшиеся после абразивного полирования, на финишной стадии которого использован абразив CeO_2 с размерами зерен 0.1 - 0.4 мкм.
- уединенные выступы (впадины-«поры») при локальных нарушениях однородности;
- остаточный хаотический рельеф;
- наночастицы, соответствующие оказавшимся на поверхности участкам кристаллитов β -эвкритита $\text{LiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$.

По результатам исследования можно сделать вывод, что максимальная эффективность в удалении следов механохимического воздействия получается при обработке ускоренными кластерными ионами при напряжении 30 кВ, а последующая планаризация достигается при воздействии нейтральными атомами на том же уровне ускоряющего напряжения при отклоняющем потенциале 10 кВ. В результате обработки достигается шероховатость подложек ситалла до $R_a = 0.161$ нм, $R_{rms} = 0.211$ нм.

Литература

1. А.Г. Кузнецов, А.В. Молчанов, М.В. Чиркин, Е.А. Измайлов, Квантовая электроника, 45(1), 78-88 (2015).
2. Н.Г. Коробейщиков, М.А. Роечко, И.В. Николаев, Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2017, Сборник тезисов, Казань: Изд-во «Отечество»), 250 (2017).
3. Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов, В.В. Боровская, Е.С. Машкова, Прикладная физика, 2, 32-35 (2012).

**СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ТГц КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ
НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНО-ФОНОННОГО ДИЗАЙНА**

****Р.А. Хабибуллин¹, Н.В. Шаврук¹, Д.С. Пономарев¹, Д.В. Ушаков², А.А. Афоненко²,
О.Ю. Волков³, В.В. Павловский³***

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова 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

**EMISSION SPECTRA OF THE THZ 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***

¹V.G. Mokerov Institute 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.

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

We have designed and fabricated terahertz quantum cascade lasers (THz QCLs) based on GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As three and four-quantum well active module with resonant-phonon depopulation scheme. The emission spectra of the fabricated THz QCLs was investigated.

В работе были изготовлены и исследованы ТГц ККЛ на основе каскада, состоящего из трех- и четырех квантовых ям (КЯ) GaAs/AlGaAs с резонансно-фононным дизайном. Максимумы усиления предложенных структур соответствуют 94 мкм (3.3 ТГц) и 130 мкм (2.3 ТГц) для каскадов на основе 3- и 4-КЯ, соответственно. На основе данных структур были изготовлены гребневые мезаполоски с двойным металлическим волноводом Au-Au шириной 100 мкм и длиной 1 и 2 мм, которые в дальнейшем были смонтированы на медном теплоотводе и разварены золотой проволокой.

В измеренном спектре излучения 3КЯ ТГц ККЛ (см. рис. 1) присутствуют три эквидистантные спектральные линии около 3.3 ТГц [1], что соответствует рассчитанному спектру усиления структуры. Если рассматривать одну моду, которая существует в наибольшем диапазоне токов, то максимальная перестройка частоты моды при измерении тока составила 3.7 ТГц (см. рис. 2), что, скорее всего, связано с разогревом активной области лазера и температурной зависимостью эффективного показателя преломления.

На рис. 3 представлены вольт-амперная характеристика и зависимость интенсивности интегрального излучения от тока для изготовленного 4КЯ ТГц ККЛ с длиной резонатора Фабри-Перо около 2 мм. На рис. 4 представлен спектр излучения данного лазера, на котором присутствует 7 продольные мод Фабри-Перо (ТМ₀) с интервалом около 16 ГГц и три дополнительные моды (ТМ₁), отстоящие от основных на 5.5 ГГц.

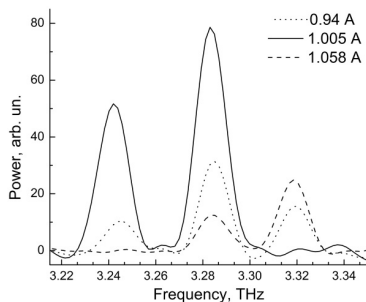


Рис. 1. Спектр излучения 3КЯ ТГц ККЛ (1 мм) при различных значениях тока

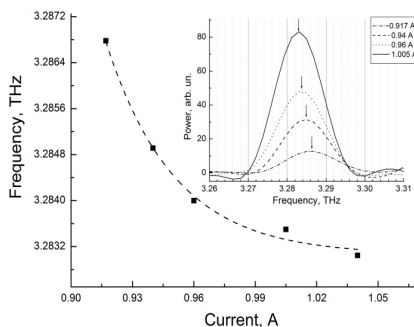


Рис. 2. Зависимость частоты излучения 3КЯ ТГц ККЛ от тока

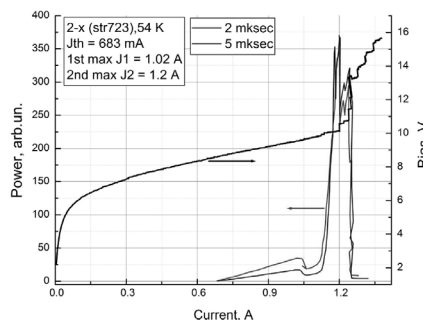


Рис. 3. ВАХ и зависимость интенсивности интегрального излучения от тока для 4КЯ ТГц ККЛ с длиной лазерного полоса около 2 мм, измеренные при 54 К

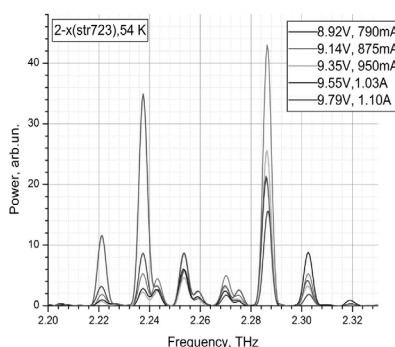


Рис. 4. Спектр излучения 4КЯ ТГц ККЛ (2 мм) при различных значениях тока

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ № 18-19-00493, РФФИ № 18-52-00011_Бел и гранта БРФФИ № Ф18Р-107.

Литература

1. О.Ю. Волков и др., Радиотехника и электроника, **63**(9), 981 (2018).

**ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫМИ АНТЕННАМИ
С ВЫСОКО-АСПЕКТНЫМИ ПЛАЗМОННЫМИ РЕШЕТКАМИ**

*Д.В. Лаврухин^{1,2}, И.А. Глинский^{1,2}, Р.А. Хабибуллин^{1,2}, А.Э. Ячменев^{1,2}, А.Ю. Павлов^{1,2},
Р.Р. Галиев¹, Ю.Г. Гончаров², И.Е. Спектор², К.И. Зайцев^{2,3}, *Д.С. Пономарев^{1,2}*

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт
сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр.5, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

³Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

**TERAHERTZ EMISSION FROM ANTENNAS UTILIZING
HIGH-ASPECT RATIO PLASMONIC GRATINGS**

*D.V. Lavrukhin^{1,2}, I.A. Glinskiy^{1,2}, R.A. Khabibullin^{1,2}, A.E. Yachmenev^{1,2}, A.Yu. Pavlov^{1,2},
R.R. Galiev¹, Yu.G. Goncharov², I.E. Spector², K.I. Zaytsev^{2,3}, *D.S. Ponomarev^{1,2}*

¹Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorniy proezd 7, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Vavilova st. 38

³Bauman Moscow State Technical University
Russia, 105005 Moscow, 2nd Bauman st. 5

We report on the design, optimization and fabrication of a plasmon-assisted terahertz (THz) photoconductive antenna (PCA) for efficient operation with low-power laser pumps. We used the numerical simulations to optimize the antenna's design, then fabricated and characterized the optimized plasmon-assisted PCA. The plasmon-assisted PCA demonstrated a record height of a metal grating $h = 100$ nm corresponding to aspect-ratio $h/p = 0.5$, which is a ratio between a height of metal to a grating period (p). The highest THz power enhancement factor which is the ratio of integrals over the THz power spectrum for the plasmonic and conventional PCAs (i.e. antenna without plasmonic gratings) was equal to 3000 corresponding to low power of the laser pump < 1.0 mW.

Предложена терагерцовая (ТГц) плазмонная фотопроводящая антенна (ФПА) с рекордной высотой металлического электрода $h=100$ нм и аспектным соотношением $h/p = 0.5$ (p - период плазмонной решетки) для использования в качестве источника в системах ТГц импульсной спектроскопии и визуализации. Экспериментально продемонстрировано, что мощность генерируемого ТГц излучения в плазмонной ФПА в 3000 раз

больше по сравнению с эквивалентной ФПА без использования плазмонной решетки.

Изображение ФПА с двумя плазмонными решетками с пассивацией диэлектриком Si_3N_4 поверхности фотопроводника приведено на рис. 1. Полный технологический процесс создания ФПА с плазмонными решетками описан в работе [1]. Исследуемые ФПА использовались в качестве источника ТГц импульсов в лабораторном импульсном ТГц спектрометре [2].

Спектры генерации исследуемых ФПА приведены на рис. 2. Стоит отметить, что формы спектров почти идентичны для двух ФПА. Однако, как видно из рис. 2, в области низких частот мощность генерации ТГц излучения в плазмонной ФПА на три порядка выше, чем в обычной антенне. Кроме того, сравнение нескольких мощностей накачки в диапазоне $P_{\text{opt}} = 1\text{--}10\text{ мВт}$ показало, что плазмонная ФПА эффективно работает именно с низкоэнергетичной лазерной накачкой, в частности, спектр генерации ТГц излучения плазмонной ФПА при $P_{\text{opt}} = 1\text{ мВт}$ примерно в три раза интенсивнее по сравнению с $P_{\text{opt}} = 10\text{ мВт}$.

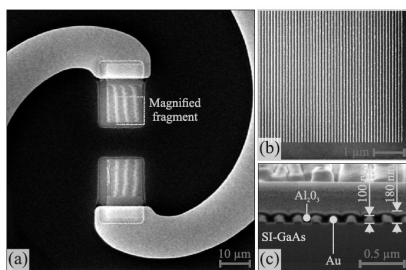


Рис. 1. Изображение ФПА с плазмонными решетками, полученное с помощью электронного микроскопа (a); увеличенное изображение плазмонной решетки (b); боковое изображение плазмонной решетки с просветляющим слоем Al_2O_3

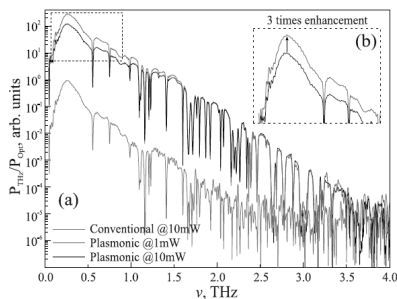


Рис. 2. Спектры генерации ТГц излучения для плазмонной и эквивалентной ФПА (без плазмонной решетки) для разной средней мощности лазерной накачки $P_{\text{opt}} = 1\text{--}10\text{ мВт}$

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 18-79-10195.

Литература

1. D.V. Lavrukhin et al., AIP Advances, **9**, 015112 (2019).
2. D.V. Lavrukhin et al., Semicond. Sci. & Tech., **34**(3), 034005 (2019).

**ИМПУЛЬСНЫЕ ТГц-ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО GaAs (111)A**

****А.Н. Ключков¹, П.М. Солянкин^{2,3}, Е.А. Климов¹, С.С. Пушкарев¹, А.П. Шкуринов^{2,3},
Г.Б. Галиев¹***

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
имени В.Г. Мокерова 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: soluanp@yandex.ru

³Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН
Россия, 140700, Шатура, Святоозерская ул., 1

**PULSED THz RADIATION FROM THE SURFACE OF EPITAXIAL STRUCTURES
BASED ON LOW-TEMPERATURE GaAs (111)A**

****A.N. Klochkov¹, P.M. Solyanin^{2,3}, E.A. Klimov¹, S.S. Pushkarev¹, A.P. Shkurinov^{2,3},
G.B. Galiev¹***

¹V.G. Mokerov Institute 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: soluanp@yandex.ru

³Institute on Laser and Information Technologies of RAS
Russia, 140700 Shatura, Moscow Region, Svyatoozerskaya st., 1

Generation of THz pulses from surface of epitaxial LT-GaAs structures was investigated using time-domain spectroscopy. The structures were prepared by molecular beam epitaxy on GaAs (100) and (111)A substrates. The three types of structures were investigated: undoped LT-GaAs layer (1 μm), Si-doped LT-GaAs layer (1 μm), superlattice structure LT-GaAs/GaAs:Si.

В работе исследовались характеристики импульсного широкополосного терагерцового (ТГц) электромагнитного излучения, генерируемого эпитаксиальными структурами на основе низкотемпературного (low temperature - LT) GaAs при облучении их импульсами лазерных систем на основе Ti:Sa (длина волны 800 нм, длительность 120 фс) с различными энергиями в импульсе и частотой повторения импульсов (0.1 мкДж, 80 МГц и 2 мДж, 1 кГц).

Образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентацией поверхности (100) и (111)A [1-3]. Образцы различались конструкцией эпитаксиальной структуры; они представляли собой либо нелегированный слой LT-GaAs толщиной 1 мкм (температура роста 240 °C), либо однородно-легированный Si слой LT-GaAs (1 мкм), либо многослойную периодическую структуру,

содержащую чередующиеся нелегированные слои LT-GaAs и легированные слои GaAs:Si, выращенные при более высокой температуре 480 °С для эффективного легирования Si (суммарная толщина слоев - 1 мкм).

Исследования проводились на импульсном ТГц спектрометре, в котором штатный источник был замещен исследуемым образцом. Линейно поляризованное лазерное излучение направлялось на поверхность образца, регистрация ТГц излучения проводилась при помощи электро-оптического эффекта на кристалле ZnTe либо при помощи болометра. Для всех образцов на подложках (111)А зарегистрированная амплитуда ТГц-поля более чем на порядок выше, чем для аналогичных структур на (100).

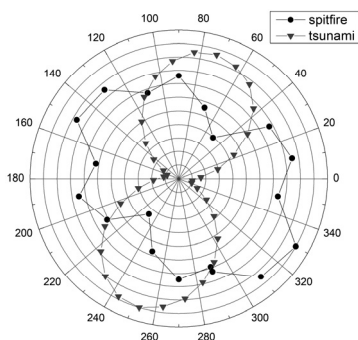


Рис. 1. Интенсивность ТГц излучения для нелегированного LT-GaAs (111)А в зависимости от азимутального угла образца

лазерной системы с меньшей энергии в импульсе в образцах есть выделенное направление, для мощных импульсов азимутальная зависимость имеет более сложный вид.

Работа поддержана грантами РФФИ № 16-29-03294 офи_м, 18-32-20207 мол-а-вед.

Литература

1. Г.Б. Галиев и др., ФТП, **52**, 395 (2018).
2. Г.Б. Галиев и др., ФТП, **53**, 258 (2019).
3. Г.Б. Галиев и др., Кристаллография, **64**, 184 (2019).

**НЕЛИНЕЙНОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ
ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЖИДКОМ АЗОТЕ**

****А.П. Шкуринов¹, А.В. Балакин¹, С.В. Гарнов², В.А. Макаров¹, Н.А. Кузечкин³,
П.А. Образцов², П.М. Солянкин³***

¹Физический факультет и Международный учебно-научный лазерный центр МГУ
имени М.В. Ломоносова

Россия, 19991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2,
e-mail: ashkurinov@physics.msu.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Россия, 119991, ГСП-1, г. Москва, улица Вавилова, дом 38

³Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН - филиал Федерального
государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»

Россия, 140700, Московская область, г. Шатура, улица Святоозерская, дом 1

**NONLINEAR ROTATION OF POLARIZATION PLANE ELLIPTICALLY POLARIZED
TERAHERTZ RADIATION IN LIQUID NITROGEN**

****A.P. Shkurinov¹, A.V. Balakin¹, S.V. Garnov², V.A. Makarov¹, N.A. Kuzechkin³,
P.A. Obraztsov², P.M. Solyankin³***

¹Faculty of Physics and International Laser Center, Lomonosov Moscow State University, Russia,
119991 Moscow, Leninskie Gory, e-mail: ashkurinov@physics.msu.ru

²A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Vavilova street 38

³Institute on Laser and Information Technologies - Branch of the Federal Scientific Research
Centre "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences
Russia, 140700 Moscow Region, Shatura, Svyatoozerskaya street 1

In this paper, we show experimentally for the first time the effect of polarization mutual action of three elliptically polarized waves propagating in the isotropic nonlinear medium (liquid nitrogen), when one of them is at a terahertz frequency. We observed nonlinear rotation of the main axis of a polarization ellipse of terahertz wave and its transformation when it propagates together with two light pulses at the fundamental and the second harmonic frequencies of Ti:Sapphire laser in liquid nitrogen. We showed that this effect could be well described theoretically in the frame of a phenomenological approach analogous to the self-rotation of the polarization ellipse expanded for the case of multi-frequency interaction.

В экспериментах, представленных в настоящей работе, впервые был зарегистрирован эффект поляризационного взаимодействия трех эллиптически поляризованных волн, распространяющихся в изотропной нелинейной среде (жидкий азот), при этом частота одной из волн находится в

терагерцовом диапазоне. Наблюдалось нелинейное вращение главной оси эллипса поляризации терагерцовой волны и его преобразование при распространении терагерцового излучения в жидком азоте вместе с двумя световыми импульсами на основной частоте генерации титан-сапфирового лазера и на частоте его второй гармоники. Показано, что этот эффект может быть хорошо интерпретирован в рамках теоретического подхода, аналогичного феноменологической модели, используемой для описания самовращения эллипса поляризации, расширенного на случай многочастотного взаимодействия.

Как правило, изменение поляризационного состояния электромагнитной волны, возможно, наблюдать при ее распространении через анизотропную или оптически активную среду [1, 2]. В свою очередь, в изотропных центросимметричных средах такое явление может возникать благодаря нелинейному взаимодействию [3, 4]. В частности, хорошо известный эффект самовращения эллипса поляризации эллиптически поляризованной волны в изотропной среде, связанный с ее нелинейностью третьего порядка, впервые наблюдался еще в 1964 [3]. При этом с увеличением степени эллиптичности поляризации и интенсивности электромагнитной волны эффект становился сильнее и полностью исчезал для линейно поляризованного света.

В настоящей работе мы исследовали, как изменяется поляризация ТГц излучения при его взаимодействии с оптическими импульсами в жидком азоте (ЖА). ЖА был выбран в качестве среды для многоволнового взаимодействия благодаря его значительной нелинейности и малому поглощению, как для ТГц, так и для оптического излучения [5]. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. В качестве источника импульсного оптического излучения в экспериментах использовалась лазерная система на базе титан-сапфирового регенеративного усилителя (Spitfire, Spectra Physics, Inc.), генерирующая световые импульсы длительностью 30 фс, следующие с частотой 1 кГц, с максимальной энергией до 2.5 мДж/имп. на длине волны 800 нм. ТГц излучение генерировалось в «двухцветной» плазме оптического пробоя воздуха. Далее оптические импульсы на основной и удвоенной частотах ω и 2ω , и ТГц импульс соосно распространялись через слой ЖА толщиной 13 мм. Поляризация ТГц излучения анализировалась с помощью полиэтиленового проволочно-сеточного поляризатора (ООО «Тидекс»).

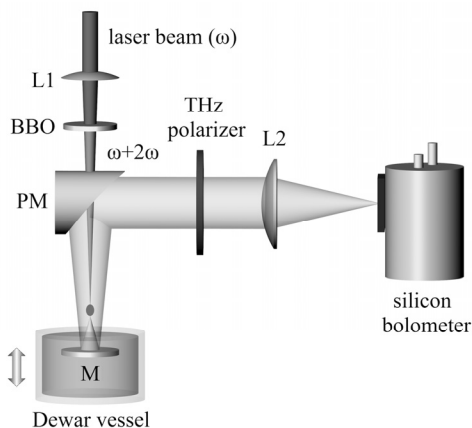


Рис. 1. Экспериментальная установка. L – линзы; M – плоское металлическое зеркало; PM – параболическое зеркало; BBO – нелинейный кристалл β-бората бария

Как видно из рисунка 2, после прохождения ТГц излучения через слой ЖА его поляризация остается эллиптической, однако степень эллиптичности поляризации ($M=2ab/(a^2+b^2)$) увеличивается от 0.323 до 0.565, а угол ориентации главной оси эллипса поворачивается на 19° (от 14.2° до 33.2°).

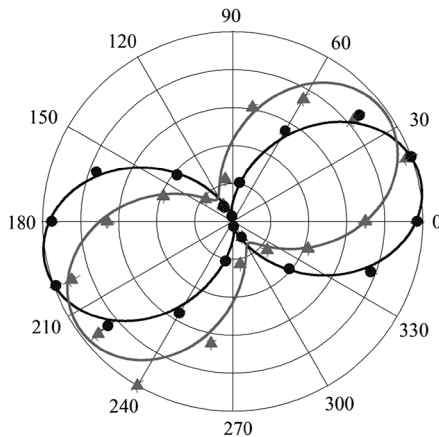


Рис. 2. Вращение эллипса поляризации ТГц излучения при прохождении через слой ЖА толщиной 13 мм. Круглыми символами отображено начальное состояние поляризации ТГц излучения, треугольными – после прохождения через слой ЖА

По результатам экспериментальных исследований была предложена феноменологическая модель для описания когерентного поляризационно-чувствительного нелинейного взаимодействия трех эллиптически поляризованных электромагнитных волн, одна из которых на ТГц частоте, при их совместном распространении в нелинейной изотропной среде. В рамках феноменологического подхода показано, что Керровская нелинейность изотропной среды, возникающая в результате четырехволнового смешения $\Omega \approx 2\omega - \omega - \omega$ ($\omega_{\text{ТГц}} = \Omega$) благодаря эллиптически поляризованным волнам на основной и удвоенной частотах, продолжающим распространяться коллинеарно с ТГц излучением, оказывает заметное влияние на состояние поляризации ТГц излучения. Мы показали, что наблюдаемые эффекты: изменение эллиптичности поляризации ТГц волны и вращение главной оси эллипса поляризации, могут быть хорошо описаны в рамках физического подхода, аналогичного использованному для объяснения самовращения эллипса поляризации впервые описанного в 1964 году Макером и др. [3], но расширенного для случая многочастотного взаимодействия.

Таким образом, впервые была показана возможность поляризационного управления ТГц излучением с помощью поляризационных состояний фемтосекундных световых импульсов за счет когерентного взаимодействия при их совместном распространении в изотропной нелинейной среде. В дальнейшем подобный тип многоволнового взаимодействия может быть использован для эффективного управления состоянием поляризации ТГц излучения.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты №18-52-16016, 18-29-20104, 17-02-01217) и частичной поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Литература

1. Y.R. Shen (The Principles of Nonlinear Optics, Wiley, 2002).
2. L.D. Barron (Molecular Light Scattering and Optical Activity, Cambridge University, 2004).
3. P.D. Maker, R.W. Terhune and C.M. Savage, Phys. Rev. Lett., **12**, 507 (1964).
4. S.A. Akhmanov, G.A. Lyakhov, V.A. Makarov and V. I. Zharikov, Opt. Acta **29**, 1359 (1982).
5. J. Samios, U. Mittag and T. Dorfmueller, Mol. Phys., **56**, 541 (1985).

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ

**Г.З. Гареев¹, С.С. Анистратенко¹*

¹Научно-исследовательский Центр Безопасности Технических Систем 12 ЦНИИ МО РФ
Россия, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, дом 39
e-mail gazinurg@hotmail.com

TERAHERTZ COMMUNICATIONS AND QUANTUM CRYPTOGRAPHY

**G.Z. Gareev¹, S.S. Anistratenko¹*

¹Scientific 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 reviews the latest trends in THz communications research, focusing on how photonics technologies have played a key role in the development of 1st age THz communication systems. The experimental THz wireless links in both indoor and outdoor environments are discussed. Both line-of-sight and out-of-sight (specular reflection) links are considered. The new research finds that a clever eavesdropper can steal THz signals undetected. The high-rate THz quantum cryptography is possible over distances from a few meters using direct reconciliation, to about 220 m via reverse reconciliation. A specific example of the physical hardware and architecture that could be used to realize THz quantum key distribution scheme is shown.

В связи с резко возросшим трафиком мобильной передачи данных в последние годы (согласно прогнозу, к 2021 году ежемесячный трафик превысит 49 экзабит) весьма актуально развивать и осваивать терагерцовый диапазон электромагнитных волн [1]. Основным драйвером роста трафика является интенсивно развивающийся интернет вещей (IoT). Терагерцовый диапазон позволяет достичь скоростей передачи данных от 100 Гб/с (на открытом пространстве) до 1 Тб/с (в помещениях на небольших расстояниях). Основными факторами, ограничивающими дальность ТГц связи, являются сферическое расширение волны (геометрический фактор) и атмосферное ослабление (поглощение, рассеяние, сцинтилляции, турбулентность). Для увеличения дальности связи и мощности сигнала на приемнике необходимо повысить мощность передатчика, коэффициенты усиления приемо-передающих антенн, а также уменьшить атмосферное ослабление. Последнее возможно при работе в так называемых «окнах прозрачности». На частотах свыше 1 ТГц электромагнитные волны сильно поглощаются молекулами воды и кислорода и ослабляются в 10 раз на расстоянии до 1 м, что, однако, вполне приемлемо для ближнепольной (до 0,1 м) связи в помещениях (например, для считывания

банковских карт и электронных карт допуска на КПП, а также передачи данных между электронными гаджетами). Высокоскоростные лучи легко блокируются различными препятствиями, непрозрачными в миллиметровом и терагерцовом диапазонах. Поэтому принято считать, что связь ограничена линией прямой видимости или траекторией, включающей малое число зеркальных отражения от гладких поверхностей. В 2018 году были проведены успешные эксперименты по испытаниям ТГц не прямых линий связи по траекториям, включающим зеркальные отражения, как в помещениях, так и на открытом воздухе (пространстве) [2]. Последние эксперименты показали техническую возможность прослушки (перехвата) ТГц канала связи с помощью размещения отражающих (рассеивающих) металлических миниатюрных объектов (плоских и цилиндрических) в зоне канала связи [3]. Квантовая криптография, основанная на принципах квантовой механики, позволяет гарантированно защитить канал связи от возможной прослушки. Основным методом квантовой криптографии является распределение квантовых ключей (QKD), основанное на теореме о запрете клонирования (no cloning theorem) и моногамной запутанности (monogamy of entanglement). Недавно был разработан и практически реализован метод CV-QKD в расширенном ТГц диапазоне (100 ГГц – 50 ТГц) [4]. Предложена аппаратная (приборная) реализация оптико-терагерцовой конверсии, основанная на связи ТГц и оптических полей с фононами в резонаторе Фабри-Перо. В режиме прямой сверки интенсивность ключей составляет 10^{-2} бит/использование на расстояние от 4 м при частоте 0,1 ТГц до 7,5 м при частоте 30 ТГц. Этого достаточно, например, при использовании банковских карт для транзакций или электронных карт доступа на КПП. В режиме обратной сверки на частоте 30 ТГц реализуется интенсивность ключей 10^{-3} бит/использование на расстоянии до 220 м.

Литература

1. T. Nagatsuma, G. Ducournau, C. Renaud, Nat. Photonics, 10, 371 (2016).
2. J. Ma, et al., Appl. Phys. Lett. Photonics, 3, 051601 (2018).
3. J. Ma, et al., Nature, 563, 89 (2018).
4. C. Ottaviani, et al., Terahertz quantum cryptography, arXiv: 1805.0354v1 [quant-ph] 9 May (2018).

ЭФФЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ВНУТРЕННЕГО УСИЛЕНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВЫХ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ GaAs/AlAs

*А.А. Александян¹, Л.Н. Жерихина¹, *А.Л. Карузский¹, Ю.А. Митягин¹, В.Н. Мурзин¹,
А.В. Пересторонин¹, 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

THE INTERNAL AMPLIFICATION EFFECTS IN GaAs/AlAs TERAHERTZ RESONANT TUNNELING NANOSTRUCTURES

*A.A. Aleksanyan¹, L.N. Zherikhina¹, *A.L. Karuzskii¹, Yu.A. Mityagin¹, V.N. Murzin¹,
A.V. Perestoronin¹, 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

The study of GaAs/AlAs resonant tunneling diode terahertz detectors demonstrates that an RTD serves as an internal amplifier of weak electromagnetic signals, provided by the region of negative differential conductance.

Терагерцовое излучение перспективно для использования в скоростной связи, биологических и медицинских датчиках, для неразрушающей оценки, в том числе, в системах безопасности. Диапазон терагерцовых волн попадает между электроникой и оптикой, между классическим и квантовым описанием физических процессов, делая их одинаково плодотворными для изучения новых явлений. Предпочтение в твердотельных источниках, детекторах, модуляторах и компактных системах имеют современные квантовые материалы и гетероструктуры, структуры с транспортом носителей в атомарных эпитаксиальных слоях, микро электромеханические системы, плазмонные резонаторы, мета материалы. Учёт динамики носителей необходим для оптимизации устройств на основе кинетического описания отклика, нелинейных свойств, взаимодействия света с веществом в современных терагерцовых материалах.

Проявления внутреннего усиления в области отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) ВАХ наблюдались в GaAs/AlAs резонансно-туннельных диодах (РТД) [1] терагерцового ($\geq 10^{13}$ Гц) быстрого действия. Детектирование мощности внешнего поля (P_{in}) на ОДП (от -1,65 В до -1,28 В на рис. 1) не соответствует процессу, пропорциональному кривизне ВАХ ($\partial^2 I / \partial U^2$) и проявляющемуся вне области ОДП (от

-1,28 В до -0,9 В) как пропорциональное мощности P_{in} уменьшение модуля кривизны («остроты») резонансного пика с параллельным сдвигом участка ОДП. За счёт внутреннего усиления в области ОДП переменным параметром становится усиленная мощность (P_{am}) [1] и детектирование характеризуется А/Вт-чувствительностью $(\partial^2 I / \partial U^2) / (\partial I / \partial U)$, где знаменатель учитывает изменение знака приращения тока и увеличение кривизны периодических (рис. 1, с СВЧ) особенностей разрывного типа на ОДП. Не зависящие друг от друга P_{am} и выпрямленный ток $I(u(t))$ в виде $(\partial^2 I / \partial U^2) P_{am} = (\partial I / \partial U) I(u(t))$ на стационарной ВАХ соответствуют в этом выражении нулевым или бесконечным производным, проявляющимся как «ступеньки» на ВАХ и «разрывы» на производных, т.е. как экспериментальные эффекты процессов внутреннего усиления (рис. 1).

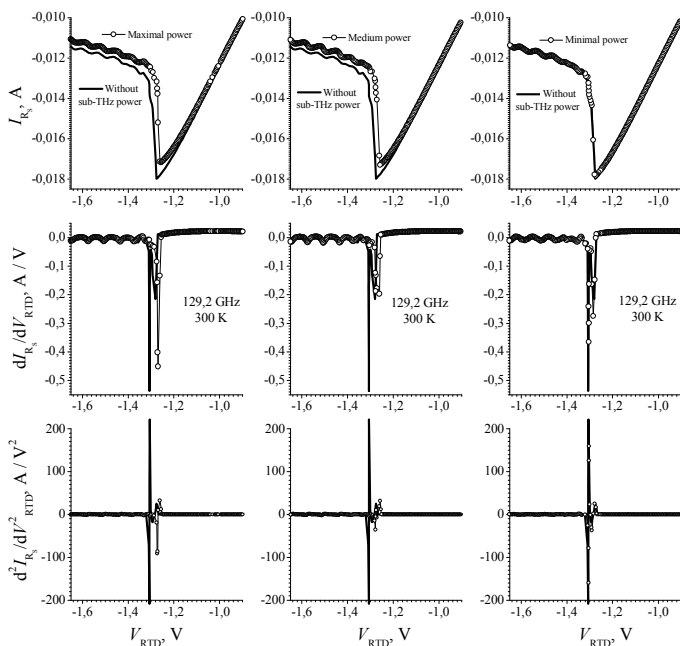


Рис. 1. ВАХ, её первая и вторая производные для РТД при наличии и в отсутствие СВЧ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (18-02-00874, 17-29-10039).

Литература

1. А.А. Алексанян и др., (Мокеровские чтения: сборник трудов, М.: МИФИ) 114 (2018).

**ПРОДВИНУТАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МУЛЬТИБАРЬЕРНЫХ AlGaAs/GaAs СТРУКТУР СЛОЖНОЙ АРХИТЕКТУРЫ**

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

**ADVANCED MODEL OF CALCULATING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS
OF MULTI-BARRIER AlGaAs/GaAs STRUCTURES OF COMPLEX ARCHITECTURE**

****V.A. Gergel¹, *N.M. Gorshkova¹, A.S. Sobolev^{1,2}, 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, Institutsky pereulok 9

In the framework of the thermal injection model of the above-barrier electron current through a rectangular undoped energy barrier, the problem of the electrical conductivity of a multi-barrier heterostructure is considered. The specificity of this task lies in the fact that when calculating the above-barrier current through a particular barrier layer, it is necessary to take into account the dependence of the electron temperature in front of this barrier on the magnitude of the voltage on the previous barrier. Taking into account this circumstance, an appropriate algorithm has been developed for successively calculating the voltages on each of the barrier layers and their subsequent summation.

Рассмотрена задача расчета электропроводности мультибарьерной гетероструктуры в рамках термоинжекционной модели надбарьерного электронного тока через прямоугольный нелегированный энергетический барьер [1,2]. Специфика данной задачи заключается в том, что при расчете тока через барьерный слой необходимо учитывать зависимость электронной температуры перед этим барьером от величины напряжения на предыдущем барьере. С учетом этого требования разработан алгоритм последовательного расчета напряжений на каждом из барьерных слоев, а затем их последующее суммирование. Достоинство представленного метода заключается в том, что он позволяет рассчитывать ожидаемые S-образные вольт-амперные характеристики (ВАХ) мультибарьерных структур сложной архитектуры с произвольными значениями толщин и

составом слоев их образующих. Сама мультибарьерная структура представляет собой перемежающиеся высокоомные и низкоомные слои.

В рамках используемого термоинжекционного механизма электропроводности электронный ток через каждый из барьеров структуры определяется электрическим полем в отдельном i -м барьере или напряжением на отдельном i -м барьере, а также температурой электронного потока перед этим барьером. Температура электронного потока является функцией напряжения на предыдущем ($i-1$) барьере. В алгоритм заложены последовательные вычисления парциальных напряжений на каждом барьере, начиная с первого, относительно направления электронного дрейфа, а также результирующее суммирование этих напряжений. При суммировании напряжений пренебрегаем малым омическим падением напряжения на сильнолегированных контактных и промежуточных слоях GaAs.

Результаты моделирования парциальных напряжений в квазиоднородной мультибарьерной структуре убедительно демонстрируют существенные различия ВАХ парциальных характеристик соседних барьерных слоев. Результирующая ВАХ получается суммированием парциальных напряжений при фиксированных значениях тока. Одно из главных достоинств предлагаемого алгоритма вычисления заключается в том, что он обеспечивает расчеты ВАХ мультибарьерных гетероструктур сложной архитектуры, в которых высота и толщина составляющих ее энергетических барьеров может произвольным образом отличаться друг от друга.

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).

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОРЕЛАКСАЦИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИБАРЬЕРНЫХ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПИТАНИИ

***В.А. Гергель¹, *Н.М. Горшкова¹, А.С. Соболев^{1,2}, 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 автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, строение 5

FEATURES OF THERMORELAXATION OF QUASISTATIC VOLT-AMPERAL CHARACTERISTICS OF MULTIBARRIER $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ HETEROSTRUCTURES AT PULSE FOOD

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

³V.G. Mokerov Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of RAS Russia, 117105 Moscow, Nagorny passage 7/5

The object of research is an instrument-based multilayer heterostructure based on GaAs / AlGaAs with tunnel-opaque layers. The process of thermal relaxation of quasistatic V-I characteristics of multi-barrier heterostructures under pulsed power supply is investigated.

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 гетербарьеров. Структура представляла собой послойное чередование узкозонных и широкозонных слоев (рассчитывались толщины слоев, их число, степень легирования слоев, химический состав). Для данной структуры выявлены специфические нелинейные вольт-амперные характеристики (ВАХ) [1–3].

В рамках квазигидродинамической модели электронного дрейфа в мультибарьерных гетероструктурах с разной высотой потенциальных барьеров рассчитываются пространственные распределения электронной температуры и электрического потенциала как функции плотности электронного потока. Выполненные расчеты позволяют спроектировать соответствующие тестовые мультибарьерные структуры так, чтобы на каждом из барьеров падающее напряжение было величиной менее 1В. Превышение величины падающего на одном барьере напряжения критически сказывается на возможности возникновения области отрицательного дифференциального сопротивления, необходимого для возбуждения электромагнитных колебаний в области субтерагерцовых частот.

На основе мультибарьерных гетероструктур 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. Для проведения экспериментальных исследований в рамках разработанного технологического маршрута получены интегральные излучающие метаповерхности (рис.1).

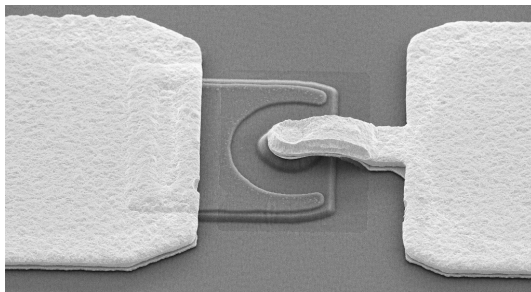


Рис. 1. РЭМ-изображение излучающего диода на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs с воздушным мостом для электрического соединения с излучающей метаповерхностью ТГц диапазона

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

Литература

1. V. A. Gergel et al, Semiconductors 48, 481, (2014).
2. V. A. Gergel et al, Technical Physics 85, 83, (2015).

**УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ФОТОПРОВОДЯЩЕЙ
АНТЕННЫ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ
МОДУЛЯЦИИ ИМПЕДАНСА**

**Д.В. Лаврухин^{1,2}, Р.А. Хабибуллин^{1,2}, А.Э. Ячменев^{1,2}, А.Ю. Павлов^{1,2},
Ю.Г. Гончаров², И.Е. Спектор², К.И. Зайцев^{2,3}, *Д.С. Пономарев^{1,2}**

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысоко-
частотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр.5, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

³Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

**SHAPING THE SPECTRUM OF TERAHERTZ PHOTOCONDUCTIVE ANTENNA
BY FREQUENCY-DEPENDENT IMPEDANCE MODULATION**

**D.V. Lavrkhin^{1,2}, R.A. Khabibullin^{1,2}, A.E. Yachmenev^{1,2}, A.Yu. Pavlov^{1,2},
Yu.G. Goncharov², I.E. Spektor², K.I. Zaytsev^{2,3}, *D.S. Ponomarev^{1,2}**

¹Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorniy proezd 7, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Vavilova st. 38

³Bauman Moscow State Technical University
Russia, 105005 Moscow, 2nd Bauman st. 5

We report on an approach for shaping the spectra of terahertz (THz) pulse generation in photoconductive antennas (PCAs) by frequency-dependent impedance modulation. We introduce a theoretical model describing the THz pulse generation in PCAs, and accounting for impedances of the photoconductor and of the antenna. Additionally we account a detector response for comparative analysis with experimental data. The observed results demonstrate agreement between the theoretical model and experiment, justifying the potential of shaping the spectra of THz pulse generation in PCAs.

В работе впервые предложен подход к управлению спектром терагерцовых (ТГц) импульсов фотопроводящих антенн-источников (ФПА) с помощью частотно-зависимой модуляции импеданса. Мы предложили теоретическую физико-математическую модель, описывающую процесс генерации ТГц излучения в ФПА с учетом частотной зависимости импедансов фотопроводника и излучающей антенны. Дополнительно мы провели моделирование фотоотклика антенны-детектора для количественного сравнения теории с экспериментом. Сравнительный анализ показал хорошую корреляцию между результатами моделирования и экспериментом, тем самым подтверждая верность предложенного подхода к оп-

тимизации спектра генерации ФПА путем модуляции ее частотно-зависимого импеданса.

Для практической демонстрации влияния частотно-зависимой модуляции импеданса на спектр ТГц импульса, мы применили разработанную теоретическую модель к широкополосным спиральным ФПА с разной закруткой витков спирали, которые были нами экспериментально изготовлены [1]. Схематично исследуемые в работе ФПА изображены на рис. 1. Результаты электромагнитного моделирования антенн приведены на рис. 2. Видно, что, несмотря на схожую топологию ФПА, изменение числа витков спирали приводит к спектральным особенностям в области низких частот (до 1 ТГц) [2].

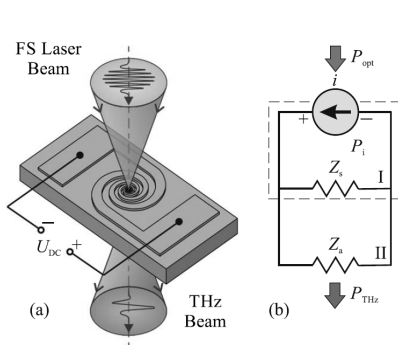


Рис. 1. Принцип работы ФПА (а) и предложенная в работе эквивалентная схема для моделирования процесса генерации ТГц излучения в фотопроводнике (б)

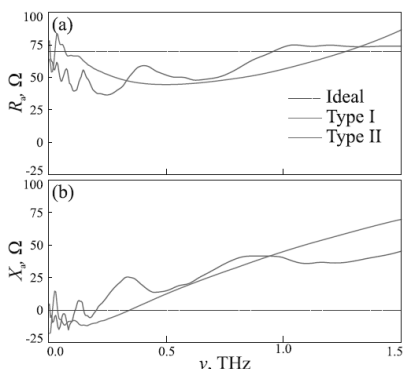


Рис. 2. Результаты электромагнитного моделирования комплексного импеданса спиральных ФПА с разной закруткой витков спирали (Type I и Type 2, соответственно)

Результаты исследования могут быть крайне полезны для систем импульсной ТГц спектроскопии и изображающих систем в различных практических приложениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-79-10195.

Литература

1. D.V. Lavrukhin et al., Proc. SPIE 10680, Optical Sensing and Detection V, **106801M** (2018).
2. D.V. Lavrukhin et al., Semicond. Sci. & Tech, **34**(3), 034005 (2019).

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН
С ПАССИВИРУЮЩИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ**

****И.А. Глинский^{1,2}, Д.В. Лаврухин^{1,2}, Р.А. Хабидуллин^{1,2}, А.Э. Ячменев^{1,2},
А.Ю. Павлов^{1,2}, Н.В. Зенченко¹, Д.С. Пономарев^{1,2}***

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт
сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр.5, e-mail: glinский.igor@yandex.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF CREATING PHOTOCONDUCTIVE
ANTENNAS WITH PASSIVATING DIELECTRIC**

****I.A. Glinский^{1,2}, D.V. Lavrukhin^{1,2}, R.A. Khabibullin^{1,2}, A.E. Yachmenev^{1,2},
A.Yu. Pavlov^{1,2}, N.V. Zenchenko¹, D.S. Ponomarev^{1,2}***

¹Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorniy proezd 7, e-mail: glinский.igor@yandex.ru

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Vavilova st. 38

Despite the progress made in the engineering of the PCA, they are extremely susceptible to the influence of dark currents. This is especially pronounced in the PCA based on $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ with a high content of In. In this paper, we report a new technology of creating a PCA with passivating a photoconductor with a SiN_x dielectric layer. Sputtering of the metallization of the PCA is carried out through etched windows in the dielectric in the region of the gap between the antenna electrodes. Thus, the area over which the current leakage can be significantly reduced. The work was carried out theoretical and experimental study of the degree of influence of the dielectric layer on the magnitude of the dark current.

Несмотря на достигнутые успехи в области инженерии фотопроводящих антенн (ФПА), они крайне подвержены влиянию темновых токов. Особенно сильно это проявляется в ФПА на основе InGaAs при большом содержании индия. В работе предложена новая технология создания ФПА с пассивацией фотопроводника слоем диэлектрика SiN_x . Напыление металлизации ФПА осуществляется через вытравленные окна в диэлектрике в области зазора между электродами антенны, но при этом сам зазор остается запассивированным. Таким образом, площадь, по которой идет утечка тока, может быть заметно снижена. В работе было проведено теоретическое и экспериментальное исследование степени влияния слоя диэлектрика на величину темнового тока.

С помощью моделирования методом конечных элементов была оценена величина темнового тока в ФПА без диэлектрика и с пассивирующим слоем. Были построены зависимости I_d от длины l контакта металл/полупроводник для ФПА с топологиями «диполь» и «бабочка» при сохранении зазора антенны 10 мкм и общей длине контактов 250 мкм (рис. 1). Видно, что уменьшение l с 120 до 10 мкм позволяет уменьшить величину I_d в 3.5 раза для дипольной ФПА и в 5 раз для ФПА с топологией «бабочка». На рис. 2 приведены измеренные ВАХ ФПА изготовленных по данной технологии.

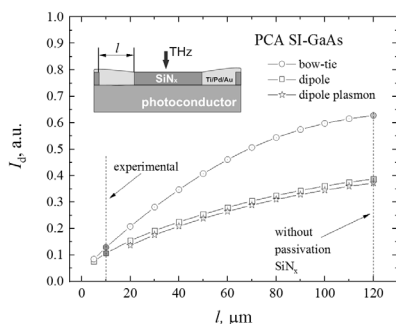


Рис. 1. Рассчитанная зависимость величины темнового тока I_d от длины l контакта «металл-полупроводник» для ФПА с топологиями «диполь» и «бабочка»

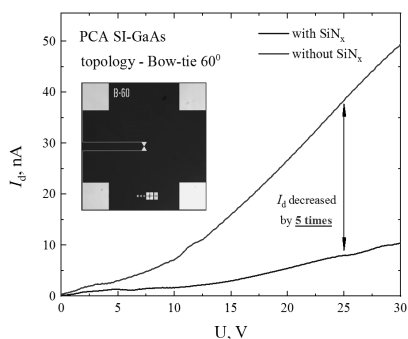


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ФПА на основе SI-GaAs с топологией «бабочка» с пассивирующим диэлектриком и без него

Видно, что наличие диэлектрического слоя под антенной сильно уменьшает паразитные токи. Для ФПА с топологией «бабочка» темновые токи имеют значения $I_d = 37.5$ нА и 7.5 нА для ФПА без диэлектрика и с пассивирующим слоем SiN_x , соответственно (при приложении напряжения между электродами $U = 25$ В).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 18-79-10195.

Литература

1. I.A. Glinskiy et al., Proc. SPIE 10800, (Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology XI) 108000D (2018).
2. И.А. Глинский и др., Оптика и спектроскопия, 126(5), 655-671 (2019).

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ: ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

** Г.З. Гареев¹, С.С. Анистратенко¹*

¹Научно-исследовательский Центр Безопасности Технических Систем 12 ЦНИИ МО РФ
Россия, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, дом 39
e-mail gazinurg@hotmail.com

BROADBAND TERAHERTZ GENERATION FROM WATER: APPLICATIONS

** G.Z. Gareev¹, S.S. Anistratenko¹*

¹Scientific 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 concealed threats (weapon, explosives, drugs, radionuclides) remote detection based on laser air-water photonics is considered. It involves the interaction of high power femtosecond laser pulses with air-water. Plasma formed in air and water 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 one and two-color laser field to create air-water plasma. The THz energy generated from water excited by two-color femtosecond intense laser pulses is about two orders of magnitude stronger than that with one color excitation scheme.

В течение последних десятилетий были проведены систематические исследования и эксперименты по генерации ТГц излучения в трех средах (агрегатных состояниях вещества) – твердом, газообразном и плазменном. В частности, воздушная плазма показала способность генерировать и детектировать импульсные широкополосные ТГц волны через нелинейные оптические процессы 3-го порядка [1]. В жидких материалах (например, в воде) может создаваться более плотная плазма (по сравнению с воздушной) при возбуждении интенсивными лазерными импульсами. Таким образом, воду можно использовать как потенциальный источник мощного ТГц излучения. Однако объемная (3х мерная) вода до сих пор не рассматривалась в качестве ТГц источника из-за сильного поглощения. С другой стороны, коэффициенты Эйнштейна предсказывают, что материал с сильным поглощением может быть мощным источником излучения. В 2017 – 2018 годах были проведены эксперименты по генерации ТГц излучения при лазерном возбуждении тонкой пленки свободно падающей воды с применением традиционной ТГц спектроскопии во временной области (THz-TDS) [2]. Амплитуда ТГц сигнала от водяной плазмы примерно в 1,8 раза выше, чем амплитуда сигнала от воздушной

плазмы. Эксперименты подтвердили возможность генерации широкополосного ТГц излучения при облучении фемтосекундным одноцветным лазером тонкой свободно падающей пленки воды. В конце декабря 2018 года вышла публикация об успешном эксперименте по двухцветной лазерной генерации широкополосного ТГц излучения в тонкой (120 мкм) водяной пленке [3]. Мощность ТГц излучения на 2 порядка превысила мощность излучения при одноцветной лазерной генерации (для одинаковой мощности лазера и фокусирующей геометрии). Когда лазерный луч фокусируется на водяную пленку, он также создает воздушную плазму вблизи границ раздела двух сред. Поэтому необходимо учитывать комбинированный вклад воздушно-водной плазмы в ТГц генерацию. Данные разработки можно использовать в системах контроля безопасности на акватории, береговой службы, а также вблизи водоемов, в том числе при ликвидации последствий аварий. Например, при лазерной генерации и детектировании ТГц излучения на водной поверхности рядом с плавсредствами, кораблями, возможно дистанционное обнаружения скрытых угроз (оружие, наркотики, взрывчатые вещества и радионуклиды), спрятанных в трюме вблизи ватерлинии, а также находящихся на небольшой глубине. Для регистрации УФ излучения, возникающего в плазме и модулированного терагерцовым излучением, отраженным от ВВ, могут использоваться УФ камеры. Прозрачность воды в голубой части видимого диапазона и в ближнем УФ диапазоне составляет до нескольких десятков метров. Кроме того, такие УФ камеры позволяют регистрировать черенковское излучение высокоэнергетических электронов, испускаемых подводными радионуклидами. Также можно использовать гидрофоны для регистрации акустического сигнала, генерируемого в водно-воздушной плазме, возбуждаемой мощным импульсным низкочастотным лазером, и модулированного терагерцовым излучением, отраженным от ВВ.

Литература

1. F. Buccheri, X.-C. Zhang, Lithuanian J. of Phys., 58(1) (2018).
2. Q. Jin, K. Williams, J. Dai, X.-C. Zhang (Proc. CLEO, May 15-18, San Jose, California, USA, 2018).
3. Q. Jin, J. Dai, Y. E, X.-C. Zhang, Appl. Phys. Lett., 113, 261101 (2018).

**РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОПРОВОДЯЩЕЙ АНТЕННЫ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОЙ СТРУКТУРЫ**

^{}С.А. Номоев¹, И.С. Васильевский¹, А.Н. Виниченко¹*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409, Тел. 8(915)426-99-86
e-mail: serganom@gmail.com

**DESIGN AND MANUFACTURE OF INTERDIGITATED PHOTOCONDUCTIVE
ANTENNAS**

^{}S.A. Nomoev¹, I.S. Vasilevskii¹, A.N. Vinichenko¹*

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Kashirskoe highway 31, Moscow, 115409, Tel. 8(915)426-99-86
e-mail: serganom@gmail.com

Improving terahertz (THz) radiation power and/or optics-to-THz efficiency of the photoconductive antenna (PCA) is widely recognized as one of the most attractive and challenging missions in THz community. In this work, the design of a THz PCA with interdigital structure in the active region is proposed. As a comparison, the PCA with interdigital structure that promises enhanced THz radiation than conventional PCA was also analyzed numerically.

The basic operation principle of PCA is optical pumping method. In order to develop a high efficiency PCA, it is necessary to construct a structure capable of efficiently performing phase matching of an external laser and a surface, which can maximize the light conversion efficiency. The research is being conducted to minimize the reflection of laser by forming a plasmonic structure on the surface of PCA and to minimize the loss of metal electrode by forming a diffraction lens on the interdigital-type antenna structure.

Источники и детекторы терагерцового (ТГц) излучения являются базовыми компонентами систем высокоскоростной беспроводной связи, медицинской диагностики, бесконтактного контроля качества материалов и дистанционного обнаружения опасных объектов. Разработка, исследование подобных источников - новое, перспективное направление в современной электронике [1].

Разработана и изготовлена фотопроводящая антенна (ФПА) на основе низкотемпературного арсенида галлия с встречно-штыревой структурой с закрывание металлом через диэлектрик каждого второго периода, рис. 1. Особенности данной конструкции является малые размеры между электродами-2 мкм, что приводит к более быстрому экранированию приложенного электрического поля посредством фотовозбужденных носителей и обеспечению более широкой ТГц полосы излучения. В до-

полнение такое расстояние между электродами позволяет использовать более низкое напряжение, обеспечивая необходимую напряженность электрического поля. Такое понижение напряжения дает более высокое отношение полезного сигнала к шуму. Основным принципом работы ФПА является метод оптической накачки. Чтобы разработать высокоэффективную ФПА, необходимо сконструировать структуру, способную эффективно выполнять согласование фаз внешнего лазера и поверхности, которая может максимизировать эффективность преобразования света в ТГц излучение. Исследование проводится с целью минимизации отражения лазера путем формирования плазмонной структуры на поверхности РСА и минимизации потерь металлического электрода путем формирования дифракционной линзы на структуре антенны встречного типа. Фотопроводящая антенна с встречно-штыревой структурой, которая обещает усиление ТГц излучения по сравнению с обычной ФПА, также была проанализирована численно.

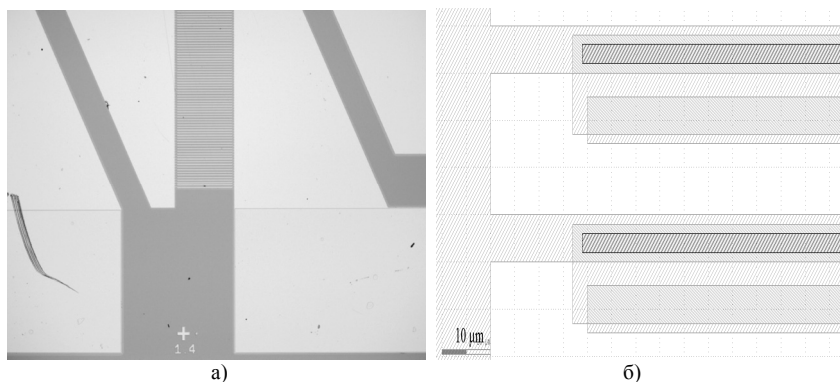


Рис. 1. ТГц ФПА (а) и её топология (б) с применением встречно-штыревой структуры с закрыванием металлом через диэлектрик каждого второго периода в программе KLayout

Литература

1. S. Nomoev et al., Tech. Phys. Lett., **44**, 44-46 (2018).

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ
ДИАПАЗОНЕ**

*А.Э. Акмалов, К.И. Козловский, Г.Е. Котковский, И.С. Крюкова, И.Л. Мартынов,
Е.В. Осипов, А.А. Плеханов, А.А. Чистяков*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: andyplekhanov81@gmail.com

**INVESTIGATION OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF PHOTONIC
CRYSTALS BASED ON POROUS SILICON IN THE TERAHERTZ RANGE**

*A.E. Akmalov, K.I. Kozlovskii, G.E. Kotkovskii, I.S. Kriukova, I.L. Martynov, E.V. Osipov,
A.A. Plekhanov, A.A. Chistyakov*

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: andyplekhanov81@gmail.com

The photonic crystal based on four layers of porous silicon was created in the course of this work. The photonic bandgap of the photonic crystal is in the range of 1.1 THz. The transfer matrix method was used for mathematical modeling of the reflection spectrum of the created structure, taking into account dispersion and absorption of radiation. The installation for terahertz imaging with spectral resolution was used for experimental determination of the reflection spectrum of the created structure.

В настоящее время исследования, проводимые с использованием терагерцового (ТГц) излучения, вызывают повышенный интерес за счёт наличия в этом диапазоне спектральных линий множества веществ (в том числе молекулярных кристаллов и макромолекул) и возможности получения ТГц изображений.

Структуры с периодически изменяющимся показателем преломления – фотонные кристаллы на основе пористого кремния с фотонными запрещёнными зонами в видимом диапазоне на данный момент активно исследуются и могут использоваться для обнаружения нитроароматических соединений [1].

В ходе выполнения настоящей работы изготовлен образец фотонного кристалла на основе четырёх слоёв пористого кремния, расположенных на кремниевой подложке. Фотонная запрещённая зона созданного кристалла находится в области 1,1 ТГц. Для математического моделирования спектра отражения такой структуры в ТГц диапазоне используется метод матриц переноса с учётом дисперсии (модель Друде) и поглощения излучения.

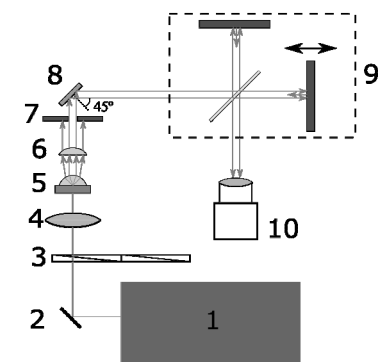


Рис. 1. Общая схема установки:
 1 – лазер, 2 – поворотное зеркало,
 3 – оптико-механический модулятор,
 4 – линза, 5 – фотопроводящая антенна,
 6 – линза, 7 – диафрагма, 8 – исследуемый образец, 9 – интерферометр Майкельсона,
 10 – терагерцовая видеокамера

Для экспериментального определения спектра отражения созданной структуры в диапазоне от 0,5 ТГц до 2,1 ТГц используется установка терагерцового радиовидения со спектральным разрешением [2]. Общая схема установки представлена на рисунке 1. В состав установки входит интерферометр Майкельсона и терагерцовая видеокамера, с помощью которых получены спектральные характеристики отдельных областей поверхности исследуемой структуры на основе пористого кремния.

Созданный образец может использоваться в исследованиях в области биологии и медицины: детектирование вредных веществ, вирусов и т.д.

Литература

1. E.V. Osipov, I.L. Martynov, D.S. Dovzhenko, P.S. Ananov, G.E. Kotkovskii, A.A. Chistyakov, *Optics and spectroscopy*, 122(1) (2017).
2. A.E. Akmalov, E.A. Aksenov, K.I. Kozlovskii, G.E. Kotkovskii, V.V. Luchinin, E.M. Maximov, Yu.A. Mityagin, A.A. Plekhanov, A.A. Chistyakov, (*Proc. SPIE 10800, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology XI*) 108000G (2018).

1000 °С. Электрические контакты МДП-структуры сформированы методом лазерного напыления палладия на поверхность SiO₂ и обратную сторону *n*-Si. Диаметр Pd-электрода на SiO₂ 3 мм. Параметры твердотельного лазера: длина волны 1,06 мкм, режим модулированной добротности, плотность мощности излучения $\sim 10^9$ Вт/см², длительность импульса ~ 10 нс, частота повторения импульсов 50 Гц.

Измерены ВФХ МДП-сенсора при различных концентрациях H₂. Пример сдвига ВФХ под действием H₂ в воздухе показан на рис. 2а. На рис. 2б показана зависимость величины сдвига ΔV от концентрации H₂, измеренного по сдвигу точки на ВФХ, соответствующей 1750 пФ.

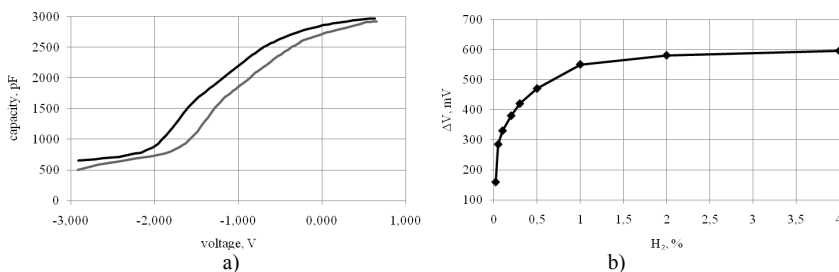


Рис. 2. а) ВФХ в чистом воздухе (справа) и в атмосфере 500 ppm H₂ в воздухе (слева); б) Зависимость сдвига ВФХ МДП-сенсора от концентрации H₂ в воздухе

Абсолютная величина сдвига $\Delta V = \Delta Q/C$, где ΔQ – изменение зарядового состояния ловушек на границе раздела металл-диэлектрик под действием молекул исследуемого газа, C – электрическая емкость структуры. Если принять, что заряд ловушки равен элементарному заряду, то поверхностную плотность ловушек ρ_s в области Pd_x(SiO₂)_y можно оценить по формуле:

$$\rho_s = N_t/S = \Delta Q/(e \cdot S) = \Delta V \cdot C/(e \cdot S),$$

где N_t – общее число ловушек в переходном слое, ΔV – сдвиг ВФХ МДП-сенсора, e – заряд электрона, S – площадь Pd-электрода, ΔQ – заряд, обеспечивающий постоянство C . При значениях $C = 1750$ пФ, $\Delta V = 600$ мВ (при концентрации H₂ 4 %) получаем $\rho_s \approx 0,9 \cdot 10^{11}$ см⁻², т. е. ловушки расположены друг от друга на расстояниях порядка 17 нм.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-79-10230). This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 18-79-10230.

Литература

1. I. Lundstrom, M.S. Shivaraman, C. Svensson and L. Lundkvist, Appl. Phys. Lett., 26, 55 (1975).
2. И.Н. Николаев, А.В. Литвинов, Е.В. Емелин, Датчики и системы, 7, 66 (2006).

**СИСТЕМА АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОРШНЯ
ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО
ИНСПЕКЦИОННОГО СНАРЯДА**

***К.В. Жуков^{1,2}**

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

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

²АО «Сигма-Оптик», Россия, 124489, г. Москва, Зеленоград, проезд 4807, дом 1, стр.9

e-mail: kirill_zhukov98@mail.ru

ACOUSTIC PISTON TRAIN CONTROL SYSTEM

***K.V. Zhukov^{1,2}**

¹National Research University of Electronic Technology

Russia, 124498, Moscow, Moscow Zelenograd, Shokina Square, Bld. 1

²«Sigma Optic», Russia, 124489, Moscow, Zelenograd, passage 4807, 1, p. 9

e-mail: kirill_zhukov98@mail.ru

To prevent accidents on the pipelines and to increase the capacity of the pipes, the cleaning of pipelines is organized by running cleaning pigs. The system of acoustic control of the passage of the piston through the main gas pipeline is designed to automatically control the movement of the piston and record the moment of its passage through the crane platforms.

Одной из важнейших задач в нефтегазовой промышленности, является контроль транспортировки ресурсов. В частности, при транспортировке газа, происходит загрязнение внутренней поверхности труб, на стенках накапливается грязь и конденсат, и, как следствие, уменьшается пропускная способность газопровода. Для предотвращения аварий на трубопроводах и увеличения пропускной способности труб организуется очистка трубопроводов, путем запуска очистных поршней. Система акустического контроля прохождения поршня (САКПП) по магистральному газопроводу предназначена для автоматического контроля движения поршня и регистрации момента его прохождения через крановые площадки [1].

Акустические сигналы возникают вследствие ударов движущегося поршня о стыки труб. Информация о движении передается внешней системе контроля по каналам телемеханики или GSM. Одновременно осуществляется запись обработанного акустического сигнала движения поршня в цифровом виде во внутреннюю память комплектов САКПП (рис. 1) [2]. По результатам обработки сигнала в выделенной полосе частот определяют текущую среднюю скорость и местоположение поршня в магистральном газопроводе.

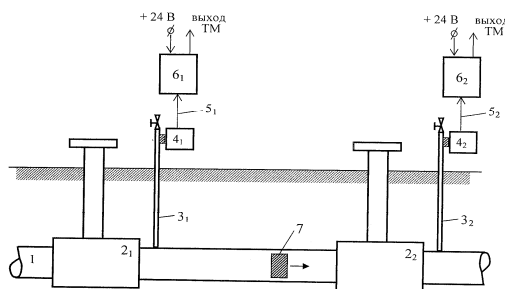


Рис. 1. Блок - схема САКПП [2]

- 1 – магистральный газопровод;
- 2 – крановые площадки с шаровыми кранами;
- 3 – стояки отбора импульсного газа;
- 4 – моноблок;
- 5 – кабели питания и связи;
- 6 – устройство управления и регистрации и GSM модем;
- 7 – поршень

В работе предложена оригинальная конструкция моноблока САКПП, благодаря которому происходит прием и обработка сигналов в широком температурном диапазоне (рис. 2). В качестве критичного узла выделена плата для обработки сигналов с микропроцессором – МК. Для нее выбран материал платы, основные компоненты, входящие в состав, в том числе микроконтроллер. Произведены расчеты надежности ячейки МК в условиях эксплуатации, предложен технологический маршрут сборки и монтажа компонентов.

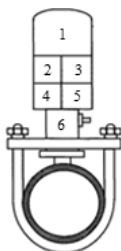


Рис. 2. Состав моноблока САКПП

В состав моноблока входят:

- 1 – плата для обработки сигналов с микропроцессором;
- 2 – плата стабилизатора питания;
- 3 – плата фильтра низкой частоты и выпрямитель;
- 4 – плата акселерометра;
- 5 – плата усилителя;
- 6 – акустический приемник

Литература

1. Н.С. Костин, Е.Ф. Токарев, А.В. Тябликов, З.А. Магомедов, Наука и техника в газовой промышленности, 75-85 (2016).
2. Патент РФ №2410597, 27.01.2011.

**КАНАЛИРОВАНИЕ ТРИПЛЕТНЫХ ПАР В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ
СВЕРХПРОВОДНИК-ФЕРРОМАГНЕТИК**

**С.Л. Прищепа^{1,2}, В.Н. Кушнир³*

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

³Белорусский государственный университет

Беларусь, 220030, г. Минск, Проспект Независимости, дом 4, e-mail: vnkushnir@gmail.com

**CHANNELING OF TRIPLET PAIRS EFFECTS IN HETEROSTRUCTURES
SUPERCONDUCTOR-FERROMAGNET**

**S.L. Prischepa¹, V.N. Kushnir²*

¹Belarus State University of RadioElectronics

Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka street 6, e-mail: prischepa@bsuir.by

²Belarus State University

Belarus, 220030 Minsk, Nezavisimosti prospect 4, e-mail: vnkushnir@gmail.com

We show that the S0 layer can transfer triplet currents with full dumping of the singlet one under the following conditions. (1) The state-function of the superconducting condensate has the node in S0-layer at parallel magnetic moments of ferromagnet layers of Superconductor-Ferromagnet structures. (2) The in-plane mutual rotation of the magnetic moments implies the transition to the state described by eigenfunction without nodes at the some value (θ_{cr}) of angle θ between magnetizations. Then, the left neighborhood of the θ_{cr} value corresponds to the almost full suppression of the singlet component and the most intensive triplet one in the whole S0-layer.

Применение гетероструктур сверхпроводник(S)/ферромагнетик(F) в наноэлектронике и спинтронике обусловлено двумя их свойствами: осцилляционным характером сверхпроводящего параметра порядка, возникновением триплетных его составляющих при неколлинеарных магнитных моментах F-слоев [1]. Осцилляционный характер параметра порядка приводит к возможности реализации спектров состояний сверхпроводимости в многослойных S/F структурах [2, 3]. В окрестностях переходов между состояниями спектра возможны необычные явления, в частности, каналирование в S-слое триплетных составляющих сверхпроводящего конденсата при почти полном подавлении в нем синглетной составляющей. Эффект может наблюдаться в структуре с нечетным числом S/F-бислоев, обладающей плоскостью симметрии в центральном S-слое (S0). Этот слой должен быть тонким настолько, чтобы, при параллельных маг-

нитных моментах F-слоев, сверхпроводящий конденсат находился в «1-состоянии» (с антисимметричной волновой функцией). В таком случае синглетная составляющая параметра порядка оказывается в значительной степени, подавленной в S0-слое. Относительное вращение магнитных моментов в F-слоях, соседних с центральным S-слоем, приводит к росту триплетных компонент и еще большему подавлению синглетной компоненты. Это происходит вплоть до некоторого угла θ_{cr} (угол кроссовера), при котором совершается переход конденсата в «0-состояние» с симметричной синглетной составляющей параметра порядка без узлов. Для значений углов, принадлежащих малой левой окрестности θ_{cr} , синглетная компонента оказывается практически полностью подавленной, а S0 слой заполнен только сверхпроводящими электронными парами с суммарным спином 1. Тогда транспортный ток, направленный вдоль слоев, индуцирует триплетный противоток, который не содержит в слое S0 примеси синглетного тока. На рис. 1 представлен график триплетной компоненты плотности тока, соответствующей проекции спина 1 на ось квантования, J_{t11} , отнесенной к синглетной компоненте J_s , рассчитанный для 5-бислойной S/F структуры, принадлежащей системе Nb/PdNi [3]. Ось OX системы координат направлена ортогонально поверхностям слоев. Магнитные моменты монодоменных F-слоев компланарны плоскости YOZ.

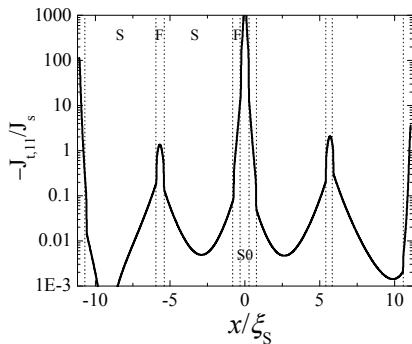


Рис. 1. Отношение плотности триплетной и синглетной компонент продольного критического тока, рассчитанного для 5-бислойной структуры $F/2[S/F]/S_0/2[F/S]/F$ со спиральной конфигурацией магнитных моментов F-слоев с углом $\theta_{cr} = 0$ между ними. Вертикальные линии означают границы между слоями

Литература

1. A.I. Buzdin, Rev. Mod. Phys., **77**, 935 (2005).
2. В.Н. Кушнир, Доклады НАН Беларуси, **52**, 39 (2008).
3. В.Н. Кушнир, М.Ю. Куприянов, Письма в ЖЭТФ, **93**, 539 (2011).

**ТРЕХМЕРНОЕ НАНОМАНИПУЛИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ
МИКРОИНСТРУМЕНТОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ
НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРНОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ**

***^{*}В. Коледов¹, В. Шавров¹, А. Шеляков², К. Бородако², А. Иржак^{3,4}, П. Лега¹, А. Орлов¹,
А.В. Фролов¹, А. Смолович¹***

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 125009, г. Москва, Моховая ул., дом 11, стр. 7, e-mail: victor_koledov@mail.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31.

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4.

⁴Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН
Россия, 142432, Московская обл, Ногинский р-н, г. Черноголовка, Институтская ул, дом 6.

**THREE-DIMENSIONAL NANOMANIPULATION WITH THE APPLICATION OF
SHAPE MEMORY MICRO-TOOLS FOR THE TECHNOLOGY OF
NANOHETEROSTRUCTURED UHF ELECTRONICS**

***^{*}V. Koledov¹, V. Shavrov¹, A. Shelyakov², K. Borodak², A. Irzhak^{3,4}, P. Lega¹, A. Orlov¹,
A.V. Frolov¹, A. Smolovich¹***

¹V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy
of Sciences, Russia, 125009, Moscow, 11/7 Mokhovaya St., e-mail: victor_koledov@mail.ru

²National Research Nuclear University "MEPhI"

Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye, 31.

³National Research Technological University "MISIS"

Russia, 119049, Moscow, Leninsky Prospect, 4.

⁴Institute of Problems of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the Russian
Academy of Sciences, Russia, 142432, Moscow Region, Noginsk District,
Chernogolovka, Institutskaya Str, 6.

The modern trends in UHF electronics towards enhancing frequency range up to THz and diminishing the scale of the elements down to nanometers create the challenge of the development of new breakthrough technologies taking advantage of new functional materials properties. The report gives the review of the modern state of the art technology of micro- and nanomechanical tools based on new functional intermetallic alloys with shape memory effect (SME). Currently the nanotweezers based on the composites with SME are developed and proved ability of 3D manipulation of the real nanoobjects, like CNTs, nanowires, micro bio-objects etc. The prospects are discussed of the application of the emerging technology of SME nanotweezers based 3D nanomanipulation and nanointegration for the new UHF devices and circuits development including semiconductor nanowire based nanosized field effect transistors (FETs), hybrid integrated circuit (HICs) etc.

В последние годы в области технологии микроэлектроники наиболее устойчивыми являются тенденции расширения частотного диапазона и снижение размера элементов до нанометрового масштаба. Современный прогресс в области микро- и наносистемной техники, базирующийся на использовании новых материалов, позволяет создавать микро- и наномеханические инструменты, способные решать задачи трехмерного манипулирования реальными нанообъектами, причем размер инструмента порядка самого объекта (см. рис. 1). Принцип работы наноинструментов основан на эффекте памяти формы (ЭПФ) в интерметаллических сплавах, таких, как Ti_2NiCu [1].

В докладе дан обзор современных представлений о достижимых с помощью ЭПФ минимальных размерах и максимальном быстродействии микромеханических инструментов с ЭПФ. Описаны эксперименты по трехмерному манипулированию реальными нанообъектами, такими как УНТ, нанопроволоки металлов и полупроводников, которые могут служить прототипами различных электронных приборов и цепей. Например, на основе нанопроволок InP создан прототип полевого транзистора (рис. 2). Обсуждаются перспективы создания автоматизированных, быстродействующих систем для наносборки различных приборов, таких как наносенсоры, гибридные интегральные схемы и др.

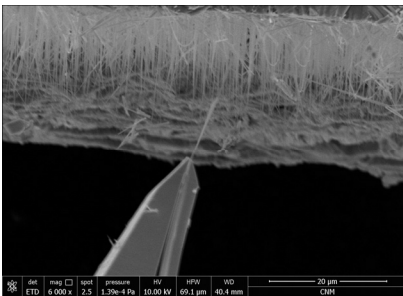


Рис. 1. Захват при помощи композитного нанопинцета с ЭПФ индивидуальной нанопроволоки InP из массива

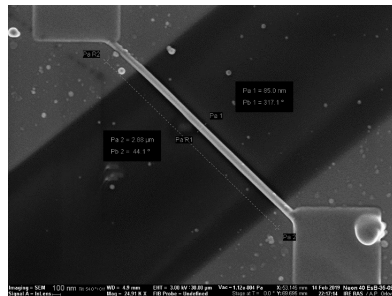


Рис. 2. Прототип полевого транзистора, сформированный из нанопроволоки InP

Работа поддержана грантом РФФИ 18-37-00466 мол_а.

Литература

1. P. Lega, V. Koledov, A. Orlov, D. Kuchin, A. Frolov, V. Shavrov, V. Khovaylo et al., Adv. Eng. Mat., 19(8), 1700154, (2017).

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛООКСИДНЫХ НАНОСЕТОК
АНОДИРОВАНИЕМ ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ Al/Nb**

^{}A.N. Pligovka¹, Г.Г. Горох¹*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, П. Бровки 6, e-mail: pligovka@bsuir.by

**FORMATION OF METALOXIDE NANOGGRIDS
BY ANODIZING BILAYER SYSTEM Al/Nb**

^{}A.N. Pligovka¹, G.G. Gorokh¹*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Republic of Belarus, 220013 Minsk, Brovka Str. 6, e-mail: pligovka@bsuir.by

Nb nanogrids formation by anodizing through anodic alumina pores at 0,4 M H₃PO₄ 150 V and 0,4 M C₄H₆O₆ 200 V requires of Nb sputter-deposited no more ~75 nm and at 0,2 M C₄H₆O₆ 250 V and 0,2 M C₆H₈O₇ 300 V no more ~100 nm. The obtained results open up possibilities of manufacturing and using Nb nanogrids in optoelectronic systems, bio- and electrochemical sensors, solar energy, etc.

Металлооксидные наносетки, сформированные методом электрохимического анодирования, известны уже несколько десятилетий. В частности, известен метод, где анодируется подслой Ta через поры анодного оксида алюминия (АОА) [1]. Данный метод имеет недостатки, в частности формирование наносеток происходит на этапе реанодирования, что ведет к усложнению и удорожанию процесса. Также не показаны возможности формирования наносеток из других вентильных металлов.

В данной работе двухслойные системы Al/Nb были проанодированы в различных электролитах, исследованы их морфологические характеристики и определены условия формирования Nb наносеток (НН) с полупроводниковыми островками на этапе анодирования. Исходные образцы – это системы Nb (снизу) 300 нм и Al (сверху) 1500 нм, сформированные магнетронным напылением в вакууме на Si пластины. Сначала анодировали Al при температуре 23 °С при 150, 200, 250 и 300 В в 0,4 М Н₃РO₄, 0,4 М С₄Н₆О₆, 0,2 М С₄Н₆О₆, 0,2 М С₆Н₈О₇. Затем проводили травление АОА в 50% Н₃РO₄ в течение 1800 с. при 50 °С. Морфология изучалась сканирующей электронной микроскопией (СЭМ).

С помощью СЭМ показано, что полученные пленки состоят из регулярно расположенных зародышевых наностолбиков, основания которых – это полупроводниковые островки NbO₂ [2], отделенные друг от друга неокисленными областями Nb, который представляет собой сетку с низкоразмерными самоупорядоченными ячейками из сверхкоротких (133-

360 нм) Nb нанопроводников, закороченных через недоокисленную пленку Nb (см. рис. 1).

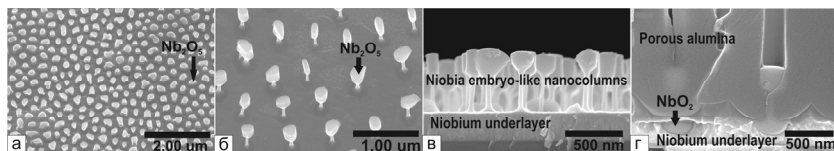


Рис. 1. Сканирующие электронные изображения анодированных систем Al/Nb.

а – 0,4 М H_3PO_4 , 150 В, поверхность после удаления АОА; б – 0,4 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$, 200 В, поверхность после удаления АОА; в – 0,2 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$, 250 В, скол после удаления АОА; г – 0,2 М $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, 300 В, скол с АОА

Для формирования НН, – без шунтирования через неокисленную пленку Nb, требуется выбрать такую толщину исходного Nb, при которой после анодирования полупроводниковые островки коснутся кремниевой пластины, то есть произойдет полное локальное окисление Nb пленки под порами АОА до подложки. Для этого требуется, чтобы толщина Nb пленки была равна или меньше высоты полупроводникового островка. Из таблицы 1 видно, что для формирования НН на этапе анодирования в 0,4 М H_3PO_4 и 0,4 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ требуется напылить не более ~75 нм исходного Nb, а для 0,2 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ и 0,2 М $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ не более ~100 нм. При значительном уменьшении толщины исходного Nb объем полупроводникового островка останется прежним, но изменится его форма и межостровковое расстояние, что окажет существенное влияние на электрофизические параметры НН.

Таблица 1

Морфологические параметры анодированных систем Al/Nb

Электролит	Напряжение, В	Высота, нм	Диаметр, нм	Nb проводники, нм
0,4 М H_3PO_4	150	76	184	133
0,4 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$	200	75	256	260
0,2 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$	250	103	269	358
0,2 М $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	300	107	273	360

Таким образом, в работе представлены исследования, позволяющие определить граничные условия, при которых на этапе анодирования в 0,4 М H_3PO_4 , 0,4 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$, 0,2 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$, 0,2 М $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ при постоянных анодных напряжениях 150, 200, 250 и 300 В формируются НН с заданными морфологическими и электрофизическими параметрами. Данные результаты открывают возможности высоко воспроизводимого изготовления и применения НН в оптоэлектронных системах, био- и электрохимических сенсорах, солнечной энергетике и др.

Литература

1. A. Mozalev et al., *Electrochim Acta.*, **44**, 3891-3898 (1999).
2. A. Mozalev et al., *J. Mater. Chem. C*, **2**, 4847-4860 (2014).

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС НАНОРАЗМЕРНОГО ДИАПАЗОНА
ДЛЯ СВЧ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FIB ТЕХНОЛОГИИ**

*Н.И. Каргин¹, Н.В. Волков¹, И.Г. Булычев¹, Н.В. Сысоева¹, С.П. Тимошенко²,
А.С. Тимошенко²*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: nvvolkov@mail.ru

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, дом 1, e-mail: alfaromeo155@mail.ru

**DESIGN OF THE NANOSCALE MEMS ELEMENTS OF MICROWAVE DEVICES
WITH USING FIB TECHNOLOGY**

*N.I. Kargin¹, N.V. Volkov¹, I.G. Bulychev¹, N.V. Sysoeva¹, S.P. Timoshenkov²,
A.S. Timoshenkov²*

¹National Research Nuclear University MEPHI

Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye shosse, 31, e-mail: nvvolkov@mail.ru

²National Research University MIET,

Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokhin square, house 1, e-mail: alfaromeo155@mail.ru

Methods for creating nano-dimensional MEMS elements for microwave devices based on bulk processing of silicon substrates using FIB-technology are considered. The presented results of creating a series of three-dimensional elements - "primitives" with sizes from 100 nm make it possible to obtain stable results of "cutting" with a focused beam of gallium ions with a current of 1-100 pA and an energy of 20, 30 keV in monocrystalline silicon with a ratio of linear sizes 50–100 rel. unit. At the same time, it is necessary to optimize the processing modes of the Ga⁺-ion beam: increase the ion energy, reduce the beam current, apply two processing steps - "rough" and "finish".

Миниатюризация элементов МЭМС и их комплектующих является одним из важнейших направлений развития современных исполнительных систем [1,2]. В этой связи применение ионных (He⁺, Ga⁺, Xe⁺) сфокусированных пучков для изготовления объемных элементов МЭМС в ряде случаев является перспективным [3]. Например, сочетание ионных и электронных пучков (технология двойных пучков) позволяют выполнять операции «профилирования» и контроля этапов обработки на размерном уровне 10–100 нм при создании так называемых «примитивов» (канавки, отверстия, контактные площадки. В случае отклонения размеров и положения «примитивов» от заданных параметров возможно исправление дефектов или повторное их изготовление на резервной площадке той же подложки, что существенно упрощает создание сложных малосерийных изделий, повышает надежность изделия в целом.

Методическая часть. В настоящей работе представлены результаты создания ряда трехмерных элементов – «примитивов», которые применяются в конструкциях МЭМС (датчики, сенсоры, акселерометры, переключающие системы). В качестве подложки использовались пластинки размером $2 \times 2 \times 0,38$ мм монокристалла кремния марки КЭФ-4,5 (100). Прецизионное профилирование и изготовление «примитивов» – элементов МЭМС реализовано по FIB-технологии [4] на установке VERSA 3D (компания FEI) при следующих параметрах обработки: ток ионов Ga^+ $i=6\text{--}100$ пА, ускоряющее напряжение 10, 20, 30 кВ, углы наклона образца $10\text{--}50^\circ$, давление остаточных газов в рабочей камере $< 6 \cdot 10^{-5}$ Па, реальное приборное разрешение на обрабатываемых образцах по ионному пучку 15–25 нм, по электронному пучку 4–10 нм.

В качестве базовой схемы миниатюрных датчиков были выбраны активные элементы, основанные на изменении электрической емкости – переключающее реле и акселерометр.

Классический ключ с резистивным соединением представлен на рис. 1, который способен коммутировать как постоянные, так переменные токи с частотой переключения более 10 МГц [5]. Однако вследствие деградации контактных площадок число переключений у таких ключей не превышает 10^9 циклов (при коммутируемых мощностях до 1 мВт), а амплитуда перемещения исполнительного механизма – кантилевера находится на уровне единиц микрометров [2].

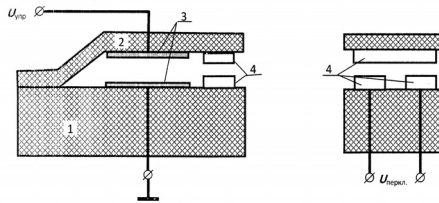


Рис. 1. Схема микрореле с резистивным ключом консольного типа: 1 – подложка, 2 – кантилевер, 3 – контакты конденсатора, 4 – контакты резистивного ключа

Частота собственных колебаний балки кантилевера обычно определяется из соотношения:

$$\omega \approx \left(\frac{E}{\rho} \right)^{0,5} \times \frac{d}{L^2}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга материала балки кантилевера, ρ – удельная плотность материала, d и L – толщина и длина балки соответственно. В случае

небольших масс ($<10^{-9}$ г) и отсутствия сопротивления среды частота колебаний кантилевера в экспериментах получена $\approx 10^8$ Гц [6].

Результаты создания наноразмерных элементов. Как следует из проведенных экспериментов по изготовлению (профилированию) элементов на кремниевой подложке методом двойного пучка возможно получение структур с параметрами от 50 нм. Однако если структурные элементы расположены достаточно близко, то в результате вторичных процессов (самораспыление, температура в зоне обработки и др.) наблюдается искажение их геометрических форм и изменение размеров (на рис. 2, область подобного дефекта отмечена эллипсом).

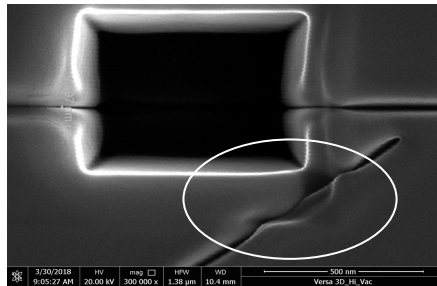


Рис. 2. Фотографии участков поверхности с фрезерованными элементами: а – на подложке КДБ-2 (111), б – на ионно-модифицированной подложке КДБ-2 (111) (приповерхностный слой легирован атомами Ве на глубину до 100 нм)

На рис. 3 в качестве примера представлена фотография поверхности подложки с профилированными канавками, выполненными с помощью пучка ионов Ga^+ при ускоряющем напряжении 20 кВ. Глубина канавок задавалась от 0,3 до 2,4 мкм при их ширине 150 нм. Как видно из состояния полученных структур, увеличение глубины профилирования приводит к росту ширины канавок вблизи поверхности примерно на 50 нм

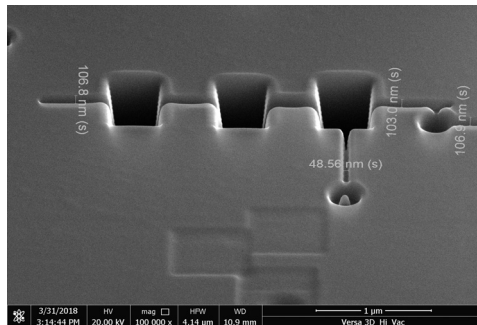


Рис. 3. Пример формирования трехмерной структуры в качестве основы исполняющих элементов МЭМС на ионно-модифицированной Si-подложке (глубина канавок изменяется от 0,3 до 2,4 мкм, ширина от 160 до 200 нм)

из-за распыления стенок канавок под действием отраженных атомов Ga и выбитых атомов подложки [7,8]. При этом границы стенки и дно канавки ровные (угол скругления не превышает 20 нм).

Обсуждение результатов, общие рекомендации. Анализ проведенных экспериментов показывает, что применение метода двойного пучка для изготовления узлов МЭМС целесообразно при размерах элементов от 20–40 нм. При этом необходимо предусмотреть два этапа обработки: предварительная – изготавливаются контуры элементов и чистовая – формируются пересечения, кромки, дорожки.

В качестве основных режимов работы предпочтительно выбирать повышенные ускоряющие напряжения – 20, 30 кВ и пониженные токи ионов Ga^+ 10–100 пА.

При указанных режимах возможно профилирование с соотношением: высоты профиля к его ширине: 10–100, длины дорожки (линии) к ее ширине от 100 и более.

Заключение. Таким образом, выполненные эксперименты на приборе VERSA 3D по изучению возможности создания элементов узлов МЭМС с размерами менее 1 мкм показали принципиальную возможность изготовления подобных систем средней сложности на монокристаллической кремниевой подложке.

Как показал анализ результатов ионной обработки, на Si-площадке 30–50 мкм удастся создать трехмерные структурные элементы МЭМС с параметрами зазоров 0,1–0,2 мкм на глубины до 2–5 мкм.

При этом необходимо оптимизировать режимы обработки пучком ионов Ga^+ , например, увеличивать энергию ионов, снижать ток пучка, использовать два этапа изготовления – «черновая» и «чистовая».

Литература

1. К.В. Куликов, (Микроэлектромеханические устройства систем связи. Владимир: Изд-во ВлГУ) 96 (2014).
2. С.А. Сысоева, Высокочастотные МЭМС-ключи. Технологии и применения, **11**, 29–36 (2011).
3. К.Н. Тукмаков, (Сб. трудов Молодёжной научной школы по нанофотонике. Nanostructures: Physics and Technology, Самара: СГУ) 10–13. (2012).
4. L.A. Giannuzzi, F.A. Stevie, (Introduction to Focused Ion Beams: Instrumentation, Theory, Techniques, and Practice. Springer, New York) 347 p. (2005).
5. С.Е. Александров, В.В. Волков, Ю.В. Соловьев, А.Б. Спешилова, Нано- и микросистемная техника, **7**, 65–68 (2007).
6. V.K. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose, (RF MEMS and Their Applications. John Wiley & Sons Ltd. USA. Pennsylvania State University) 393 p. (2003).
7. J. Lindhard, M. Sharf, H. Schiott, J. Mat. Phys. Medd. Dan. Vid. Selsk., **33(14)**, 1–42. (1963).
8. N.V. Volkov, N.I. Kargin, S.P. Timoshenkov, I.V. Oleynikov, A.A. Polyansky, D.A. Safonov, S.A. Yashin, N.V. Sysoeva, Известия высших учебных заведений. Физика, **61(8/2)**, 98–202 (2018).

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАФЕНОВОГО НЭМС-КЛЮЧА НА ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕЙ ПОДЛОЖКЕ

**Я.Б. Литун^{1,2}, В.И. Литун³, О.В. Кононенко^{1,2}, Ю.Н. Пархоменко¹, М.В. Чичков¹*

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4. e-mail: LitunY@yandex.ru

²Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, РАН
Россия, 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 6

³Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д.5.

CHARACTERISTICS RESEARCH OF GRAPHENE-BASED NEMS SWITCHES ON A SEMI-INSULATING SUBSTRATE

**Ya.B. Litun^{1,2}, V.I. Litun³, O.V. Kononenko^{1,2}, Yu.N. Parkhomenko¹, M.V. Chichkov¹*

¹National University of Science and Technology "MISIS"
Russia, 119049, Moscow, Leninsky prospect, 4. LitunY@yandex.ru

²Institute of Microelectronics and High Purity Materials, RAS
Russia, 142432, Chernogolovka, Moscow Region, Akademika Osip'yana str., 6

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow,
Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya str., 5

This report concerns various technological specificity design and manufacturing of radiofrequency graphene-based nanoelectromechanical (GNEMS) switches on a semi-insulating substrate. In the current research, GNEMS switch technology aspects are considered taking into account modern simulation, design, and fabrication features. Key results of this research include a description of the proposed GNEMS switch structure on semi-insulating substrate. The microwave performance was evaluated using full-wave numerical simulation, and the obtained scattering parameters are displayed.

В настоящем исследовании рассматривается ёмкостной ключ на полуизолирующей подложке с подвешенной графеновой мембраной с двухсторонним креплением, относящийся к классу наноэлектромеханических систем (НЭМС).

Ключ построен на основе копланарного волновода (КПВ). В области мембраны, центральный проводник КПВ расположен в канавке (рис. 1). Закрытое состояние, когда мембрана находится в нижнем положении, соответствует приложению управляющего потенциала между землей и центральным проводником. Положение «открыто» или «вверх» соответствует приложению потенциала управления между землей КПВ и контактами управления «Control-UP».

Проведено исследование характеристик ключа средствами полноволнового численного моделирования на основе метода конечных элементов.

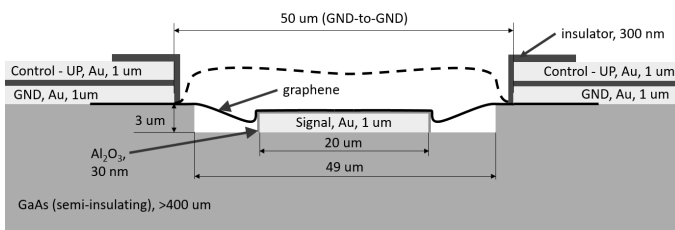


Рис. 1. Топологическая реализация графенового НЭМС-ключа

Поскольку сопротивление графена в значительной степени зависит от влияния условий окружения, этот фактор учитывается для характеристики разных участков мембраны при моделировании. В областях под металлизацией графен должен быть перфорирован, благодаря чему достигается сопротивление графена около 8 Ом/Г [1]. Подвешенная часть мембраны – 10 Ом/Г [2, 3]. Для областей контакта с подложкой выбрано компромиссное значение 250 Ом/Г [2].

Объёмное распределение тока в проводниках также учтено при моделировании.

В открытом состоянии, когда мембрана оказывает лишь незначительное влияние, коэффициент отражения не превышает –20 дБ на частотах до 65 ГГц и увеличивается до –10 дБ на 110 ГГц. Коэффициент передачи выше –0,5 дБ и –1,25 дБ в тех же диапазонах, поэтому диссипативные потери составляют 0,75 дБ или менее. В закрытом состоянии кривая коэффициента отражения достигает уровня –4 дБ на частоте 5 ГГц, затем имеет плавный изгиб с максимальным значением около –2 дБ, тогда как коэффициент прохождения составляет менее –10 дБ в диапазоне частот выше 15 ГГц с минимальным уровнем около –16 дБ при 110 ГГц.

Таким образом, даже в наихудшем случае сопротивления листа графена в областях, соприкасающихся с изолятором и подложкой, характеристики предлагаемого переключателя являются достаточными для возможного применения в перспективных устройствах микроэлектроники.

Литература

1. S. Min Song et al., Appl. Phys. Lett., **104**, 183506 (2014).
2. N. Rouhi et al., Appl. Phys. Lett., **101**, 263101 (2012).
3. X.-Y. Fang et al, Phys. Lett. A, **379**, 2245–2251 (2015).

**ФОРМИРОВАНИЕ АПЕРТУРЫ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА
С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ГЕНЕРАЦИИ 1550 НМ**

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

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

²АО "ОКБ-Планета"
Россия, 173004, г. Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, дом 2/13

**FORMING OF THE APERTURE OF VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITTING
LASER 1550 NM**

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

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, Fedorovskiy Ruchey 2/13

This paper presents the research of technology creation the aperture of wafer-fused VCSEL 1550 nm. Fabricated the samples with buried-tunnel-junction (BTJ). This paper include description of technological processes for forming BTJ in InGaAs/InAlGaAs layers and analysis of individual processing stages.

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

На этапе развития технологии изготовления ВИЛ активно использовалась технология ионной имплантации для обеспечения токового ограничения, которая формирует область с высоким сопротивлением [2]. Однако данный подход не позволяет обеспечить эффективное оптическое ограничение для поддержания стабильного одномодового режима генерации ВИЛ. В современных ВИЛ ближнего ИК-диапазона, сформированных в системе твердых растворов InAlGaAs на подложках GaAs, широко применяется технология латерального селективного окисления слоев AlGaAs с содержанием Al более 95% для формирования эффективного токового и оптического ограничения [3]. Однако применение такого подхода в гетероструктурах, сформированных в системе твердых растворов InAlGaAsP на подложках InP, сопряжено с рядом ограничений. В случае ВИЛ, сформированных методом спекания пластины активной области InAlGaAs/InP с пластинами распределенных брэгговских отражателей

AlGaAs/GaAs (рисунок 1а), возможно применение технологии селективного окисления InAlAs слоев, но данное решение сопряжено с риском латерального окисления AlGaAs слоев верхнего зеркала, ухудшением морфологии поверхности и деградацией омических контактов под воздействием высоких температур.

Для создания аперттуры ВИЛ, полученных по средствам спекания, наиболее интересной представляется концепция заращенного туннельного перехода (ЗТП), описанная в работе [4]. Данное решение позволяет обеспечить эффективное оптическое и токовое ограничение в структурах ВИЛ. Конструкция ЗТП представлена на рис. 1б.

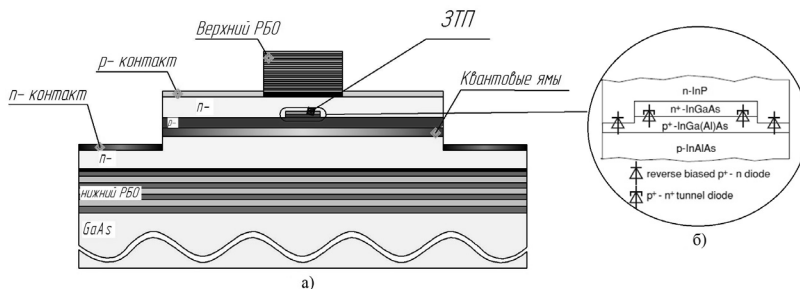


Рис. 1. а) конструкция ВИЛ, сформированного методом спекания; б) заращенный туннельный переход [5]

В данной работе исследуются технологические особенности создания ЗТП. Рассматривается процесс формирования фоторезистивной маски для последующего травления слоев туннельного перехода. При помощи сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии исследуются морфология и геометрия мезоструктур туннельного перехода, полученных различными методами.

Литература

1. N. Volet, V. Iakovlev, A. Sirbu, A. Caliman, G. Suruceanu, A. Mereuta and E. Kapon, Proc. of SPIE, **8432** (2012).
2. L.A. Coldren, H. Temkin, C.W. Wilmsen (Vertical cavity surface emitting lasers, Cambridge Univ. Press, 1999).
3. J.M. Dallesasse, N. Holonyak, J. of Appl. Phys., **113(5)**, 051101 (2013).
4. M. Ortsiefer, R. Shau, G. Böhm, F. Köhler, G. Abstreiter, M.-C. Amann, Japanese J. of Appl. Phys., **39(1,4A)**, 1727 (2000).
5. G. Eisenstein, D. Bimberg (Green Photonics and Electronics, Springer, 2017).

**ПОЛУЧЕНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlInGaPAs/InP
ДЛЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

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

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

**GROWING AlInGaPAs/InP HETEROSTRUCTURES FOR NEAR
IR RANGE PHOTO DETECTORS**

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

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Russia, 346428, Prosveshcheniya str., 132, Novocherkassk,

e-mail: kazakovaalena92@gmail.com

²Federal Research Center Southern Scientific Center Russian Academy of Sciences

Russia, 3464006, Chekhova str., 41, Rostov-on-Don, e-mail: lunin_ls@mail.ru

The kinetic characteristic of the crystallization of AlGaInAsP solid solutions on InP substrates have been studied. It was found that the crystallization rate of AlGaInAsP solid solutions on InP substrates depends on temperature, temperature gradient and depth of the liquid phase. The spectral sensitivity range of photoelectric converters is determined.

Выращивание твердых растворов AlGaInAsP проводилось на подложках InP, методом зонной перекристаллизации градиентом температуры (ЗПГТ) [1, 2]. Температура, градиент температуры и толщина жидкой зоны являются основными параметрами, влияющими на скорость роста эпитаксиальных слоев в процессе ЗПГТ. Экспериментальные зависимости $v(l)$ и $v(T)$ определялись по методике, описанной нами ранее [3] и приведены на рис. 1 а. Выращивание полупроводниковых гетероструктур AlGaInAsP/InP проводилось при температурах $813 \geq T \geq 1023$ К и градиентах температуры $10 \geq G \geq 30$ К/см. Толщину жидкой зоны (l) изменяли в пределах (10-200 мкм) (рис. 1а кривые 1, 2, 3). На рис. 1а (кривые 4, 5) показано влияние температуры T на скорость роста v при проведении процесса ЗПГТ.

Изготовление фотоприемников проводилось по технологическому маршруту, описанному ранее [4]. Максимум спектральной чувствительности находился в диапазоне $0.05 \geq \lambda \geq 1.07$ мкм и составил $0.43 \geq S \geq 0.47$ А/Вт (рис. 1б). Область спектральной чувствительности по

уровню 0.5 от максимальной составляла величину $0.67 \geq \lambda \geq 1.15$ мкм. Минимально регистрируемая пороговая чувствительность находилась в диапазоне $2 \cdot 10^{-10} \geq P_{\text{пор}} \geq 510^{-11}$ Вт. Проведенные методом фотоЭДС измерения, в системе электролит-полупроводник показали, что диффузионная длина неосновных носителей заряда была порядка 2.0-2.5 мкм, что обеспечивает высокую эффективность собирания фотоносителей.

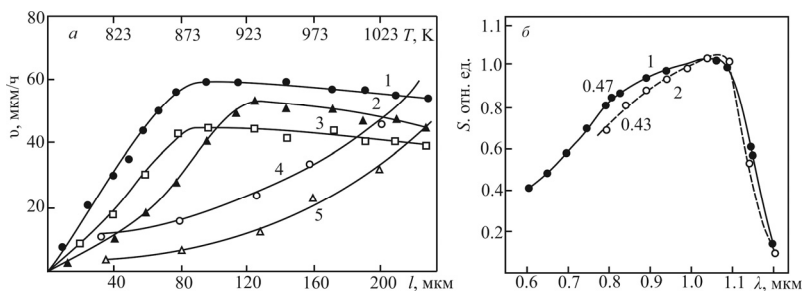


Рис. 1. Зависимости скорости роста v от толщины зоны l : 1-GaInAs, 2-GaInAsP, 3-AlGaInAsP и от температуры $T_{\text{AlGaInAsP}}$, 4 – $G = 30$ K/cm, 5 – $G = 10$ K/cm

В результате были получены зависимости скорости роста твердых растворов AlGaInAsP от технологических параметров процесса ЗПГТ: толщины жидкой зоны, температуры и ее градиента. Сформированные на основе соединений AlGaInAsP фотоприемники обладают достаточно высокой спектральной чувствительностью.

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, 212 (Ростов-на-Дону, Изд-во СКНЦ ВШ, 2008).
2. Л.С. Лунин, Сысоев И.А. Техника градиентной эпитаксии полупроводниковых гетероструктур электронной техники, 160 (Ростов-на-Дону, Изд-во СКНЦ ВШ, 2008).
3. M.L. Lunina et al., Physics of the Solid State, **60**, 890-898 (2018).
4. В.В. Кузнецов, Л.С. Лунин, В.И. Ратушный. Гетероструктуры на основе четверных и пятерных твердых растворов соединений АПВВ, 376 (Ростов-на-Дону, Изд-во СКНЦ ВШ, 2003).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КВАНТОВЫХ ЯМ И СВЕРХРЕШЕТОК ДЛЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

^{}Ю.Д. Сибирмовский¹, Н.И. Каргин¹, И.С. Васильевский¹*

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

MODELLING OF OPTICAL PROPERTIES OF QUANTUM WELLS AND SUPERLATTICES FOR ELECTRO-OPTIC MODULATORS

^{}Yu.D. Sibirmovsky¹, N.I. Kargin¹, I.S. Vasil'evskii¹*

¹National Research Nuclear University "MEPhI",
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: sibirmovsky@gmail.com

The problem of modelling the absorption coefficient and refractive index spectra of III-V heterostructures with multiple quantum wells and superlattices under applied electric field is considered. This is a crucial step in the design of efficient and compact electro-optic modulators. The goal of this work is to find a simple, fast and reliable method to qualitatively compare various heterostructure designs. The work contains comparison of existing methods as well as some new results.

Электрооптический модулятор является одним из ключевых компонентов интегральной радиوفотоники. Развитие технологий и конструкций данных приборов - приоритетная задача, как в мире, так и в РФ.

Для достижения наибольшей эффективности при минимальных размерах используется так называемый «квантово-размерный эффект Штарка» [1] - модификация оптических параметров полупроводниковых наногетероструктур под действием приложенного электрического поля.

Модуляторы рефрактивного типа основаны на изменении показателя преломления, тогда как модуляторы абсорбционного типа – на изменении коэффициента поглощения. В приближении эффективной массы, без учета смещения состояний, температуры, уширения и экситонных эффектов, межзонный коэффициент поглощения имеет вид [2]:

$$\alpha \propto \frac{\gamma}{\hbar\omega} \frac{m_{sh}^*}{m_0} \sum_{j,k} |\langle \psi_j^s | \psi_k^h \rangle|^2 \theta(\hbar\omega - E_{jk})$$

где m_{sh}^* - приведенная масса электрона и дырки, θ – функция Хэвисайда, а γ – коэффициент, зависящий от типа дырок и поляризации излучения. Для ТЕ волны основной вклад вносят тяжелые дырки, а для ТМ – легкие. В остальном поглощение (и преломление) определяется сугубо кванто-

выми состояниями носителей заряда, которые и являются объектом моделирования в данной работе.

Акцент сделан на сравнении результатов моделирования для квантовых ям и сверхрешеток (рис. 1, 2). Туннельно-прозрачные барьеры приводят к ряду эффектов, не наблюдающихся в изолированных КЯ [3].

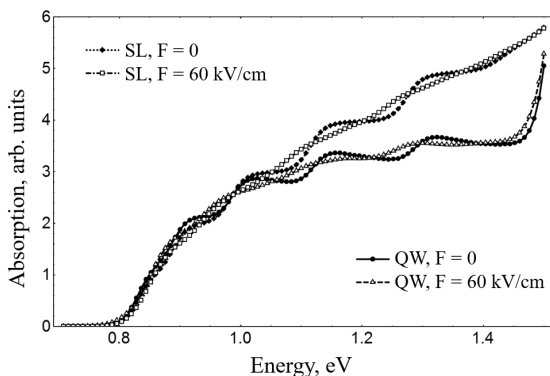


Рис. 1. Спектры поглощения КЯ InGaAs/InAlAs/InP 20 нм и СР 20/15 нм (20 периодов, в расчете на один период)

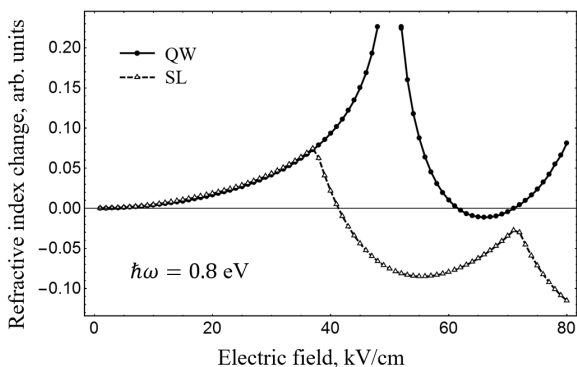


Рис. 2. Изменение показателя преломления в электрическом поле для КЯ и СР

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-20083.

Литература

1. J.S. Weiner et al., Appl. Phys. Lett., **50**, 842-844 (1987).
2. S.L. Chuang, Phys. of Photon. Dev., (Wiley, New York, 2009).
3. J. Bleuse, et al., Phys. Rev. Lett., **60**(3), 22023 (1988).

**РАЗРАБОТКА СТРУКТУР С МКЯ InAlGaAs НА ПОДЛОЖКЕ InP
ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ РАДИОФОТОНИКИ, ВЫРАЩЕННЫХ
КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ MBE/MOCVD**

^{}И.С. Васильевский¹, А.Н. Виниченко¹, Ю.Д. Сибирмовский¹, П.Л. Доброхотов¹,
М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², Ю.Л. Рябоштан², Н.И. Каргин¹, М.Н. Стриханов¹*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: ivasilevskii@mail.ru

²АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1

**DEVELOPMENT OF MULTIPLE InAlGaAs QW STRUCTURES GROWN
BY COMBINED MBE/MOCVD TECHNIQUE ON InP SUBSTRATES
FOR MICROWAVE PHOTONICS**

^{}I.S. Vasil'evskii¹, A.N. Vinichenko¹, Yu.D. Sibirmovsky¹, P.L. Dobrokhoto¹, M.A. Ladugin²,
A.A. Marmalyk², Y.L. Ryaboshstan², N.I. Kargin¹, M.N. Strikhanov¹*

¹National Research Nuclear University «MEPhI»

Kashirskoe shosse 31, 115409, Moscow, e-mail: ivasilevskii@mail.ru

²POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh. 117342, Moscow, Vvedenskogo St. 3/1

Combined MOCVD/MBE epitaxial growth technique is realized for p-i-n InGaAsP multiple quantum well heterostructure on InP substrate for integrated microwave photonic application. The effect of growth condition and structure layout on XRD and photoluminescence spectra is examined.

Интегральная микроволновая фотоника представляет широкие возможности для создания многофункциональных устройств для генерации, преобразования и обработки СВЧ сигналов с использованием оптического инфракрасного (ИК) излучения в качестве «несущей». Наиболее используемым является С/С+L диапазон с длиной волны $\lambda \sim 1.55$ мкм. Полупроводниковые (ПП) гетероструктуры с множественными квантовыми ямами (МКЯ) InAlGaAsP на подложке InP представляют собой один из основных материалов для реализации фотонных интегральных схем (ФИС), так как позволяют реализовать как активные (лазер, усилитель, модулятор, фотодетектор), так и пассивные (волновод, узлы ввода-вывода, мультиплексоры, фильтры) элементы ФИС. Разработка ПП МКЯ структуры является наиболее критичным элементом инжиниринга ФИС, поскольку определяет предельно достижимые параметры элементов. Если для активных элементов ПП МКЯ структура должна иметь переходы в области $\lambda \sim 1.4$ мкм, то для создания пассивных элементов необходимо снижать потери путем подбора состава ПП с переходами в области $\lambda < 1.2$ мкм или даже меньшей, во-вторых, для создания волноводных слоев необходимо использовать ПП с большим контрастом показателя прелом-

ления – на основе InGaAsP. Современные сложные ФИС изготавливают путем эпитаксиального дорастивания пассивных слоев с использованием MOCVD технологии. С другой стороны, метод МЛЭ имеет преимущества для контроля роста многокомпонентных МКЯ структур.

В работе реализован трехэтапный рост ПП МКЯ структур: методом MOCVD формировались нижние $n\text{-InP}/n\text{-i-InGaAsP}$ контактный и ограничивающий волновод слой, затем МКЯ область формировалась методом МЛЭ (в НИЯУ МИФИ), а затем верхние $i\text{-InGaAsP}/p\text{-InP}$ слои зарастивались методом MOCVD (в АО «НИИ «Полус»).

Определены условия для щадящего разложения окисла в камере МЛЭ с темпелитной структуры, изготовленной методом МОС-гидридной эпитаксии. Была проведена оптимизация слоевого дизайна МКЯ нескольких типов: решеточно-согласованного, симметрично-напряженного дизайнов с узкозонным слоем как из $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, так и из $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47-z}\text{Al}_z\text{As}$, что позволило увеличить ширину узкозонного слоя. Методом МЛЭ при различных режимах роста изготовлены образцы с МКЯ и проведена их характеристика по спектрам фотолюминесценции (ФЛ) и рентгеновской высокоразрешающей дифрактометрии (РД) (рис. 1). Данные РД показывают хорошее согласование состава ПП слоев МКЯ с подложкой InP, большое количество побочных максимумов от сверхрешетки, имеющих малую полуширину, что свидетельствует о структурном качестве МКЯ.

Спектры ФЛ оптимизированных структур демонстрируют интенсивную полосу в области 1440–1460 нм с полушириной 80–90 нм, что обеспечивает высокое значение КЭШ при низких потерях излучения длиной волны около 1550 нм.

Данные структуры были взяты за основу разработки интегрального модулятора Маха-Цендера C/L диапазона. Технология комбинированного роста может быть в дальнейшем использования для создания многофункциональных ФИС.

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

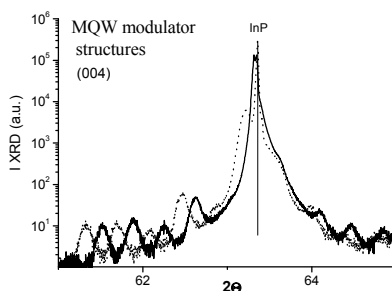


Рис. 1. Кривая дифракционного отражения в окрестности максимума (004) подложки GaAs и эпитаксиального слоя AlAs

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИСКОВОГО ЛАЗЕРА
НА СТРУКТУРЕ InGaAs/GaAs ПРИ НАКАЧКЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

****М.Р. Бутаев^{1,2}, А.Ю. Андреев³, Т.А. Багаев³, Н.А. Гамов⁴, Н.И. Гладышев⁴, М.М. Зверев^{2,4},
В.И. Козловский^{1,2}, Я.К. Скасырский², И.В. Яроцкая³***

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Каширское шоссе,
д. 31, 115409, г. Москва, тел. +7(962)3716651, e-mail: mbutayev@mail.ru

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Ленинский пр., д. 53, 119991, г. Москва

³НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха. Ул. Введенского, д. 3, корп. 1, 117342, г. Москва

⁴Российский технологический университет «МИРЭА».

Пр. Вернадского, д. 78, 119454, г. Москва

**STUDY OF E-BEAM PUMPED SEMICONDUCTOR DISK LASER BASED
ON InGaAs/GaAs HETEROSTRUCTURE**

****M.R. Butaev^{1,2}, A.Y. Andreev³, T.A. Bagaev³, N.A. Gamov⁴, N.I. Gladyshev⁴, M.M. Zverev^{2,4},
V.I. Kozlovsky^{1,2}, Y.K. Skasyrsky², I.V. Yarotskiya³***

¹National Research Nuclear University «MEPhI». Kashirskoe shosse 31, 115409, Moscow
ph. +7(962)3716651, e-mail: mbutayev@mail.ru

²P.N. Lebedev Physical institute. Leninsky pr. 53, 119991, Moscow

³POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh. Vvedenskogo St. 3/1, 117342, Moscow

⁴MIREA - Russian Technological University. Vernadsky Avenue 78, 119454, Moscow

Semiconductor disk laser based on InGaAs/GaAs heterostructure was studied at e-beam pumping. The structure was grown by metalorganic chemical vapour deposition and consisted of 10 quantum wells and Distributed Bragg Reflector mirror. Using pulse-periodic regime of pumping, peak output power of 2.5 W at wavelength of 1030 nm was achieved. Pulse duration was 100-250 ns and pulse rate was 50 Hz. Laser beam divergence was less 10 mrad at 2.5 W.

Полупроводниковый дисковый лазер (ПДЛ) интенсивно развивается с момента выхода первой публикации в 1997 году [1]. Многочисленные применения этих лазеров связаны с высоким качеством лазерного пучка при мощности в несколько ватт, возможностью плавной перестройки длины волны излучения и освоением актуальных спектральных диапазонов: УФ, видимого, среднего ИК и терагерцового диапазонов.

Наилучшие результаты по ПДЛ были получены на структурах с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs/GaAs, излучающими на длине волны вблизи 1.03 мкм. В ряде случаев предпочтительно использовать широкозонные гетероструктуры типа InGaN/GaN или гетероструктуры на основе соединений A_2B_6 , излучающих в сине-зеленой области спектра. Однако для накачки таких структур пока нет коммерчески доступных и эффективных лазерных диодов. В этой связи актуальной является накачка электронным пучком. ПДЛ лазер на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs был исследован при накачке электронным пучком в работе

[2]. В настоящей работе мы представляем аналогичные исследования с использованием гетероструктуры InGaAs/GaAs, выращенной в России методом эпитаксии из металлоорганических соединений.

Структура содержала 10 КЯ In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs с компенсирующими упругие напряжения слоями GaAs_{0.93}P_{0.07} и встроенное брэгговское зеркало из 30 пар Al_{0.92}Ga_{0.08}As/GaAs. Спектры фотолюминесценции и отражения структуры представлены на рис. 1. Внешнее вогнутое зеркало ПДЛ имело радиус кривизны 30 мм и коэффициент отражения 98% на длине волны вблизи 1.015 мкм. Оно помещалось внутри вакуумной камеры. Схема ПДЛ представлена на рис. 2. Длина резонатора составляла 26 мм. Структура закреплялась серебряной пастой на медном хладопроводе, который находился при комнатной температуре (~20 °С). Электронный пучок падал на структуру под углом примерно 30° и сканировал импульсно-периодически вдоль строки. Излучение ПДЛ выводилось из вакуумной камеры через окно из свинцового стекла ТФ-5 с помощью поворотного Al зеркала. Излучение регистрировалось с помощью калиброванного фотокатода ФЭК-29.

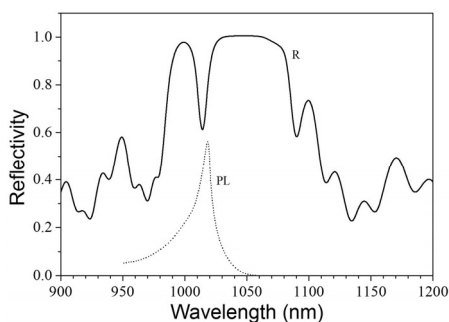


Рис. 1. Спектры отражения и фотолюминесценции

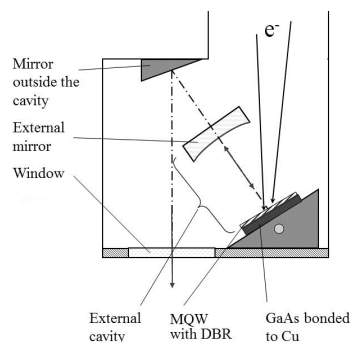


Рис. 2. Схема ПДЛ

На рис. 3 представлены основные результаты исследования ПДЛ. Лазер работал в импульсно периодическом режиме с длительностью импульса 100-250 нс при частоте повторения 50 Гц. Максимальная пиковая мощность составила 2.5 Вт. Порог генерации по току был вблизи 0.2 мА при диаметре электронного пятна близком к диаметру основной моды резонатора 80 мкм. При небольшом превышении порога генерации картина дальней зоны соответствовала основному поперечному типу колебаний с полным углом расходимости 4 мрад. При максимальной мощности возбуждались несколько поперечных мод. Максимум спектра генера-

ции приходился на $\lambda = 1013$ нм. Спектр был промодулирован модами резонатора, соответствующего толщине структуры включая ростовую подложку GaAs.

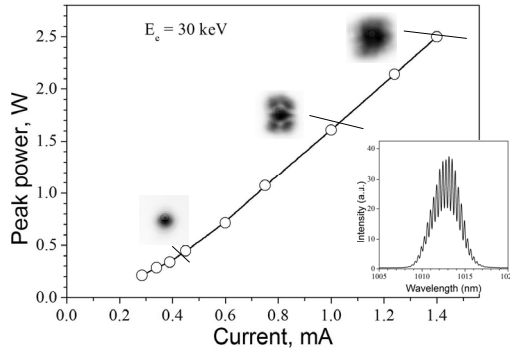


Рис. 3. Зависимость пиковой мощности импульса от тока электронного пучка. На вставках – картины дальнего поля при различных токах и спектр генерации

В заключение отметим, что в данной работе исследован ПДЛ с накачкой электронным пучком на структуре InGaAs/GaAs, выращенной впервые в России.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 18-02-00436.

Литература

1. M. Kuznetsov et al., IEEE Photonics Technol. Lett., 9, 1063-1065 (1997).
2. V.I. Kozlovsky et al., IEEE J. Quantum Electronics, 49(1) 108-113 (2013).

**КРЕМНИЕВЫЕ ЛАВИННЫЕ СВЕТОДИОДЫ И ОПТИЧЕСКИЕ
МЕЖСОЕДИНЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ**

**С.К. Лазарук, А.А. Лешок, Ле Динь Ви, В.В. Долбик,
А.С. Лазарук, А.В. Клопоцкий, С.Л. Перко, В.А. Лабунюв*

Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», Беларусь, 220013, г Минск, ул. П. Бровки, 6,
e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

SILICON AVALANCHE LEDS FOR OPTICAL INTERCONNECTS

**S.K. Lazarouk, A.A.Leshok, Le Dinh Vi, V.V. Dolbik,
A.S. Lazarouk, A.V. Klopotskiy, S.L. Perko V.A. Labunov*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Belarus, 220013, city Minsk, 6 P. Brovki street,
e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

The design and manufacturing technology of integrated electrical and optical interconnects on a silicon chip are developed. The light-emitting diodes in the presented construction are based on nanostructured silicon built in an alumina matrix. The developed system has the current transforming coefficient of about 1 % and can operate in the gigahertz frequency range, which opens up new opportunities for its integration with classical interconnects on a single chip.

В настоящее время одной из актуальных задач развития интегральной электроники является повышение быстродействия. Замена электронных межсоединений на оптические позволит повысить быстродействие интегральных микросхем за счет устранения резистивно-емкостных задержек металлической разводки. Следовательно, возникает необходимость интеграции электронных и оптических межсоединений внутри кремниевого чипа. Нами разработана и изготовлена экспериментальная структура интегрированных электронных и оптических межсоединений на едином кремниевом кристалле, а также исследованы ее характеристики. Полученные результаты представлены в настоящей работе.

Разработанная конструкция состоит из двух контактов Шоттки на основе контакта Al/Si, а также из слоя анодного оксида алюминия, разделяющего алюминиевые электроды. Нижний слой анодного оксида алюминия содержит кремниевые наночастицы, излучающие свет в режиме лавинного пробоя контакта Шоттки [1]. Один из диодов Шоттки при смещении, превышающем пороговую величину лавинного пробоя, работает как светодиод, второй при электрическом смещении менее

напряжения лавинного пробоя функционирует как фотодетектор. Анодный оксид алюминия выполняет двойную роль. С одной стороны, он выполняет функции световода с сердцевинной, легированной оксидом титана, а с другой стороны, он вместе с кремниевыми наночастицами обеспечивает излучение света [2]. То есть свет, излучаемый кремниевыми наночастицами, проходит внутри слоя анодного оксида алюминия как по оптическому волноводу.

При обратном смещении светодиодов на величину 4 В и выше их излучение регистрировалось интегрированными фотодетекторами. Коэффициент преобразования разработанной оптоэлектронной ячейки, определяемый отношением тока фотодетектора к току светодиода достигает величины 1 %.

Быстродействие системы определяется площадью контакта Шоттки. Эксперименты показали, что диоды с рабочей площадью менее 400 мкм² способны работать в гигагерцовом диапазоне частот. При этом расчеты показывают, что при уменьшении размеров контакта до единиц микрон лавинные светодиоды будут способны работать в терагерцовом диапазоне.

Разработанная оптоэлектронная система способна работать в однофотонном режиме регистрации выходного сигнала, что может быть использовано в качестве генерации случайных чисел для квантовых компьютеров.

Таким образом, разработаны конструкция и технология изготовления электронных и оптических межсоединений на кремниевом чипе. Среди основных характеристик разработанной системы необходимо отметить, что коэффициент преобразования по току достигает 1 %, что открывает новые возможности для ее интеграции с классическими межсоединениями на едином чипе.

Литература

1. С.К. Лазарук и др., ФТП, 41(9), 1126 (2007).
2. S.K. Lazarouk et al., Microelectron. Eng., 50(1-4), 81 (2000).

**ПЛАНАРНЫЙ АЛЮМООКСИДНЫЙ ВОЛНОВОД ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ
ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ**

****С.К. Лазарук¹, А.А. Лешок¹, Ле Динь Ви¹, Т.А. Козлова¹***

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

PLANAR ALUMINA WAVEGUIDE FOR SILICON OPTICAL INTERCONNECTIONS

****S.K. Lazarouk¹, A.A. Leshok¹, Le Dinh Vi¹, T.A. Kozlova¹***

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013 Minsk, P. Browka 6, e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

Design and manufacturing technology of planar alumina waveguide is developed. The key feature of alumina waveguide manufacturing was successive magnetron sputtering of three targets: consisting of aluminum, an aluminum-titanium alloy and again aluminum. At the last stage, local porous anodization of the multilayer aluminum-titanium film was carried out through a mask previously formed on the surface. The low porosity of the oxide films, as well as the presence of an internal nanocomposite layer, made it possible to reduce the optical losses in the waveguide structures to 0.5 dB/cm. The possibility of integrating the developed waveguide with light-emitting and photoreceiving devices on a silicon chip is demonstrated, which is a significant step towards the realization of optical intra-chip interconnects.

Оптические межсоединения по сравнению с электронными обладают рядом преимуществ, среди которых следует особо отметить быстродействие и помехоустойчивость. Реализация оптической связи внутри интегральных схем осуществляется при помощи планарных волноводов, соединяющих источники световых сигналов и фотодетекторы. В связи с этим нами была разработана конструкция планарного алюмооксидного волновода с сердцевинной из нанокompозитного материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$.

Алюмооксидный волновод изготавливали при помощи последовательного магнетронного распыления трех мишеней: состоящих из алюминия, алюминиево-титанового сплава и снова алюминия. Последовательное прохождение кремниевых подложек под распыляемыми мишенями обеспечивало осаждение многослойной пленки алюминий/алюминий-титан/алюминий с градиентным изменением концентрации атомов титана, максимум концентрации которых находился в центральной части пленки и достигал 25 ат.%. Толщина осажденной пленки составляла 1 мкм.

Поверх многослойной пленки осаждали пленку ниобия толщиной 0,3 мкм. При помощи операций фотолитографии и плазмохимического травления ниобия формировали маску, которую использовали для локального пористого анодирования многослойной пленки. Процесс анодирования проводили в 5% водном растворе H_2SO_4 при плотности тока 100 мА/см². Таким образом, формировали алюми-

ниевые электроды для светодиодов и многослойный алюмооксидный волновод между ними. Схематичное изображение разработанной конструкции волновода представлено на рис. 1.

Низкая пористость оксидных пленок, а также наличие внутреннего нанокompозитного слоя, обеспечивающего увеличение показателя преломления до 1,8 [1], позволили снизить оптические потери в формируемых волноводных структурах до 0,5 дБ/см. Достигнутый уровень соизмерим с аналогичными результатами зарубежных исследователей, полученными для алюмооксидных волноводов. Для дальнейшего улучшения этих параметров необходимо уменьшать пористость алюмооксидных пленок и оптимизировать геометрию и оптические параметры сердцевины.

Таким образом, разработанная конструкция планарного алюмооксидного волновода с сердцевиной из нанокompозитного материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ характеризуется минимальными оптическими потерями порядка 0,5 дБ/см. Продемонстрирована возможность интеграции разработанного волновода со светоизлучающими и фотоприемными устройствами на кремниевом чипе, что является значимым шагом на пути к реализации оптических внутрочиповых межсоединений.

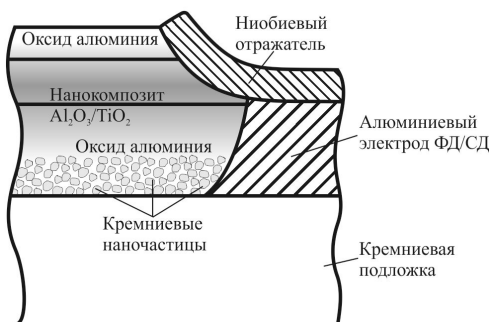


Рис. 1. Схематичное изображение фрагмента поперечного сечения разработанной конструкции планарного многослойного волновода

Литература

1. S.K. Lazarouk, D.A. Sasinovich, V.E. Borismko, Phys. Stat. Sol., **5**, 3690 (2008).

**ФОТОРЕВЕРСИВНЫЙ ТОК В СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ
НА ОСНОВЕ InGaN/GaN ЗЕЛЁНОГО СВЕЧЕНИЯ С РАЗНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ
КВАНТОВЫХ ЯМ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ**

**А.Э. Асланян¹, Л.П. Авакянц¹, А.В. Червяков¹, А.Н. Туркин¹, А.В. Мазалов²,
В.А. Курешов², Д.Р. Сабитов², А.А. Мармалюк²*

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы д. 1 стр. 2.

e-mail: aslanyan.artiom@physics.msu.ru

² ООО «Сигм Плюс», Россия, 117342, г. Москва, ул. Введенского, дом 3

**PHOTOREVERSIBLE CURRENT IN GREEN LED HETEROSTRUCTURES BASED
ON InGaN/GaN WITH DIFFERENT NUMBER OF QUANTUM WELLS
IN THE ACTIVE REGION**

**A.E. Aslanyan¹, L.P. Avakyan¹, A.V. Chervyakov¹, A.N. Turkin¹, A.V. Mazalov²,
V.A. Kureshov², D.R. Sabitov², A.A. Marmalyuk²*

¹Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991 Moscow, Leninskie Gory 1 b. 2, e-mail: aslanyan.artiom@physics.msu.ru

²Sigm plus Co., Russia, 117342 Moscow, Vvedenskogo st. 3

InGaN/GaN based LED heterostructures with different numbers of quantum wells in the active area were investigated by the photocurrent spectroscopy at room temperature. The effect of changing the direction of photocurrent on the wavelength change was observed after analyzing spectral series at different bias voltages of the p-n junction. It is shown that the voltage at the p-n junction, which is necessary for the appearance of this effect, increases with the number of quantum wells.

Светодиодная гетероструктура на основе GaN с квантовыми ямами (КЯ) InGaN/GaN в активной области *p-n*–перехода является модельным объектом для изучения фотовозбуждения и поглощения в таких оптоэлектронных устройствах, как фотоприёмник или солнечная батарея. Состав слоёв, концентрации легирующих примесей и внутренние электрические поля определяют конфигурацию потенциального барьера, влияющего на ток в активной области. В данной работе исследуется фотовозбуждение в светодиодных гетероструктурах с разным количеством КЯ InGaN/GaN методом спектроскопии фототока (ФТ).

Образцы представляли собой светодиодные гетероструктуры зелёного свечения с 1, 2, 3 или 5 КЯ в активной области, выращенные вдоль направления [0001] на сапфировой подложке методом газофазной эпитаксии. Спектры фототока были получены при комнатной температуре в диапазоне 2.5–3.5 эВ. К *n*- и *p*- области были выведены индиевые контак-

ты, на которые подавалось смещение p - n -перехода в диапазоне от -1 до +4 В. При таких напряжениях отсутствовала излучательная рекомбинация.

Полученные спектры ФТ показали, что при определённом смещении p - n -перехода направление тока фотовозбуждённых носителей заряда зависит от длины волны падающего света (рис. 1). При поглощении, обозначенном на рис. 1 буквой «А», электрон из барьера валентной зоны оказывается в барьере зоны проводимости слоя GaN. Электроны, образованные таким образом, даже при прямом смещении p - n -перехода создают обратный ток. С увеличением прямого смещения напряжённость электрического поля в барьере уменьшается, зоны в барьере выравниваются и обратный ток прекращается. Наблюдается смещение в коротковолновую область спектра.

Поглощение, обозначенное на рис. 1 буквой «Б», по-видимому, связано с переходом с акцепторного уровня в валентной зоне в барьерном слое около области p -GaN на уровни зоны проводимости.

Потенциальный барьер в сторону p -области для таких электронов оказывается достаточно большим даже при малых отрицательных смещениях, чтобы возник прямой ток. С увеличением смещения прямой ток будет увеличиваться в соответствии с обычными процессами в гомогенном p - n -переходе.

Такое поведение тока наблюдается для всех образцов, однако с ростом количества КЯ, минимальное смещение, необходимое для такого эффекта, растёт.

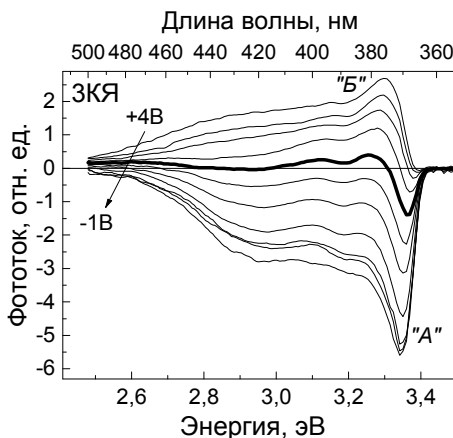


Рис. 1. Спектры ФТ при разных смещениях p - n -перехода светодиодной гетероструктуры с тремя КЯ InGaN/GaN в активной области. Выделен спектр ФТ, зарегистрированный при минимальном смещении p - n -перехода, при котором наблюдается фотореверсивный эффект

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНЫХ И АIN ТЕПЛОТВОДЯЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ В МОЩНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ
НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР АЗВ5**

****В.П. Гордеев^{1,2}, В.В. Безотосный^{1,2}, В.А. Олещенко^{1,2}***

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт
им. П.Н. Лебедева РАН, Москва 119991, Ленинский проспект 53

**PROSPECTS FOR APPLICATIONS OF DIAMOND AND AIN HEAT SINK ELEMENTS
IN A POWERFUL OPTOELECTRONIC DEVICES BASED
ON AZB5 HETEROSTRUCTURES**

****V.P. Gordeev^{1,2}, V.V. Bezotosnyi^{1,2}, V.A. Oleshchenko^{1,2}***

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia

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

We present the results of 3D mechanical stress and strain modelling of CW laser diode arrays (LDA) assembled on the CS-mount type heat sinks with Diamond and AIN submounts. The LDA strain have been measured. The dependences of the LDA mechanical stress profiles on thermal load from 20 up to 300 W in different sections on LDA calculated and discussed.

Лазерные технологии являются одним из наиболее продвинутых инструментов в широком спектре научных и прикладных областей от медицины и информационной инфраструктуры до обработки материалов и военной промышленности. В недавней работе [1] сообщалось о получении рекордной мощности 880 Вт от одной линейки в кратковременном CW режиме, что открывает новые горизонты применений. Получение экстремально высоких уровней выходной мощности от одиночных лазерных диодов (ЛД) и ЛЛД [2-5] в ресурсном режиме затруднено вследствие недостаточной эффективности отведения тепловой энергии, что, в свою очередь, приводит к неравномерному распределению тепловой энергии и увеличению механических нагрузок в кристалле. В работе [6] получено ~ 4,6 кВт при использовании метода спектрального суммирования излучения ЛЛД. Применение метода спектрального суммирования требует повышения однородности мощности и спектров излучения кластеров по всей излучающей апертуре ЛЛД. Неоднородности потока тепла и механических термоупругих напряжений приводят к потере качества излучения лазерных линеек, что существенно ограничивает их выходную мощность, ресурс и области практических применений. В ряде исследо-

ваний последних лет приведены оценки величин термоупругих напряжений для лазерных сборок с использованием алмазных и AlN сабмаунтов [7, 8]. Вследствие сложности и трудоёмкости 3D моделирования, отсутствия детальных экспериментальных исследований механических нагрузок и ростом интереса к термоупругим напряжениям в ЛД и ЛЛД представляется перспективным исследование термоупругих свойств ЛД и ЛЛД, смонтированных на алмазных и AlN теплоотводящих элементах.

В данной работе проведено 3D моделирование рабочего режима ЛЛД, собранной на теплоотводящем элементе типа CS-маунт на алмазных и AlN сабмаунтах при тепловой нагрузке от 20 до 300 Вт CW. По результатам моделирования построены температурные профили и профили механических напряжений и деформаций в плоскости активной области излучающей апертуры лазерного кристалла, по глубине лазерной сборки и по длине резонатора. Экспериментально измерены деформации лазерного кристалла. Обнаружены важные особенности распределения механических напряжений и деформаций в лазерном кристалле. Проведен анализ полученных данных для различных конфигураций ЛЛД, обсуждается их соответствие экспериментальным результатам работ [9,10].

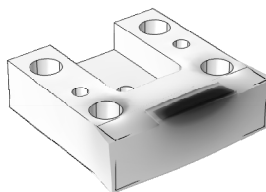


Рис. 1. Картина температурных полей при 100 Вт тепловой нагрузки

Литература

1. S.G. Strohmaier et al., Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering., **43**, 369 (2017).
2. В.В. Безотосный и др., Квантовая электроника, **44**, 899 – 902 (2014).
3. В.В. Безотосный и др., Квантовая электроника, **44**, 145 – 148 (2014).
4. В.В. Безотосный и др., Квантовая электроника, **45**, 1088 – 1090 (2015).
5. В.В. Безотосный и др., Квантовая электроника, **46**, 679 – 681 (2016).
6. R.K. Huang, Teradiode's high brightness semiconductor lasers (2016).
7. Zh. Zhiyong et al. (Thermal Modeling and Analysis of High Power Semiconductor laser Arrays, International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2012).
8. Yao Lu Zhiqiang Nie et al. (17th International Conference on Electronic Packaging Technology) 76-83 (2016).
9. В.В. Безотосный и др., Квантовая электроника, **48**, 115 – 118 (2018).
10. В.В. Безотосный и др., Квантовая электроника, **48**, 502 – 505 (2018).

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

– А –

Авакянц Л.П., 194
Аверьянов Д.В., 79, 87, 89
Аврамчук А.В., 49, 77
Айзенштат А.Ю., 63
Акмалов А.Э., 163
Аксенов А.А., 33
Алексамян А.А., 149
Алексеев А.Н., 69
Алфимова Д.Л., 71
Амракулов М.М., 119
Андреев А.Ю., 189
Анистратенко С.С., 147, 159
Антонова Н.В., 49
Арапов Ю.Г., 11
Аронзон А.Б., 27
Артеев Д.С., 33
Арустамян Д.А., 183
Асланян А.Э., 194
Афоненко А.А., 139

– Б –

Багаев Т.А., 189
Баглов А.В., 81, 99, 103
Бакун А.Д., 135
Балакин А.В., 143
Баранова М.С., 85
Безотосный В.В., 196
Богданов Е.В., 21
Борисенко В.Е., 81
Борисенко Д.П., 75
Бородако К., 171
Бульчев И.Г., 175
Бурдаков Я.В., 115
Бурдыкин М.С., 41, 49
Бутаев М.Р., 189
Бухтияров А.А., 111

– В –

Васильев П.С., 43
Васильев Р.Б., 93
Васильевский И.С., 11, 49, 65, 67, 125, 161, 185, 187
Васильченко А.А., 23
Великовский Л.Э., 33
Виниченко А.Н., 11, 49, 65, 67, 125, 161, 187
Волков В.А., 13
Волков Н.В., 175
Волков О.Ю., 139
Воронец Я.С., 73
Воропаев К.О., 181

– Г –

Галиев Г.Б., 141
Галиев Р.Р., 47, 139
Гамов Н.А., 189
Гареев Г.З., 147, 159
Гарнов С.В., 143
Гаршев А.В., 93
Гвоздовский Д.Ч., 101
Гергель В.А., 151, 153
Гимальдинова М.А., 117
Гладышев Н.И., 189
Глинский И.А., 139, 157
Гнидько А.А., 103
Голованов А.В., 111
Гончаров Ю.Г., 139, 155
Гордеев В.П., 196
Горелов А.А., 49, 51
Горох Г.Г., 105, 173
Горшкова Н.М., 151, 153
Гранько С.В., 73
Гришаков К.С., 113, 117
Гудина С.В., 11

–Д–

Давыдов А.Б., 27
Данилина Э.М., 71
Данилюк А.Л., 83
Демченко О.И., 33
Дерюшкина Е.В., 11
Дмитриев Д.В., 63
Доброхотов П.Л., 125, 187
Долбик В.В., 192
Драгуль М.В., 43, 45

–Е–

Евлашин С.А., 109
Енишерлова К.Л., 37

–Ж–

Желаннов А.В., 57, 59
Жерихина Л.Н., 149
Жуков К.В. 167
Журавлев К.С., 63

–З–

Заболотных А.А., 13
Заварин Е.Е., 33
Загороднев И.В., 25
Зайцев К.И., 139, 155
Заиченко А.Н., 133
Закгейм Д.А., 33
Захарченко Р.В., 41, 49
Зверев М.М., 189
Зенченко Н.В., 157
Золотарев А.А., 53
Зотов А.О., 107
Зубков В.И., 19
Зуев А.В., 47

–И–

Иванова Я.В., 19
Инюшкин А.В., 55
Ионов А.С., 59, 181
Иржак А., 171

–К–

Казаков А.А., 27
Казакова А.Е., 183
Каратеев И.А., 79, 87, 89
Каргин Н.И., , 41, 49, 51, 65, 67, 75, 77,
97, 113, 117, 131, 135, 175, 185, 187
Карузский А.Л., 149
Катин К.П., 113, 117, 121
Кислицин М.В., 107
Клековкин А.В., 61
Климов Е.А., 141
Клоков А.Ю., 109
Клопоцкий А.В., 192
Клочков А.Н., 141
Ковалевский А.А., 73
Ковальчук Н.Г., 75, 97
Козловский В.И., 189
Козловский К.И., 163
Коледов В., 171
Колковский Ю.В., 37
Комиссаров И.В., 75, 77, 83, 95, 97
Кононенко О.В., 179
Концевой Ю.А., 123
Копылов В.Б., 127
Корнеев В.И., 37, 123
Коровин О.В., 111
Королев Н.А., 165
Котковский Г.Е., 163
Красовицкий Д.М., 29
Крюкова И.С., 163
Кузечкин Н.А., 143
Кузьмин Е.В., 43
Курбанова Н.Е., 33
Курешов В.А., 194
Курикалов В.В., 33
Куртина Д.А., 93
Кушнир В.Н., 169

–Л–

Лабунов В.А., 75, 77, 192
Лаврухин Д.В., 139, 155, 157
Ладугин М.А., 187
Лазарук А.С., 192
Лазарук С.К., 192

Ле Динь Ви, 192
Лебедев А.И., 91
Лега П., 171
Лешок А.А., 192
Лисимова Е.С., 81, 103
Литвинов А.В., 165
Литун В.И., 179
Литун Я.Б., 49, 179
Лозовенко А.А., 105
Ломов А.А., 133
Лундин В.В., 33
Лунин Л.С., 71, 183
Лунина М.Л., 71, 183
Луценко Е.В., 69

– М –

Мазалов А.В., 194
Майтама М.В., 61
Макаров А.В., 17
Макаров В.А., 143
Мамаев В.В., 69
Маренкин С.Ф., 27
Мармалюк А.А., 187, 194
Мартынов И.Л., 163
Маслов М.М., 113, 117, 121
Медведев Б.К., 37, 123
Меринов В.Б., 113
Метель Ю.В., 115
Мехия А.Б., 27
Минина Н.Я., 21
Минкин В.С., 151, 153
Митягин Ю.А., 149
Михалик М.М., 77, 95
Мишарин Д.М., 45
Мурзин В.Н., 149

– Н –

Неверов В.Н., 11
Нигериш К.А., 97
Никитенко В.Р., 115, 119
Новиков В.А., 17
Новиков С.А., 69
Номов С.А., 161

– О –

Образцов П.А., 143
Овешников Л.Н., 27
Опещенко В.А., 196
Орлов А., 171
Осипов Е.В., 163

– П –

Павлов А.Ю., 139, 153, 155, 157
Павлов В.Ю. 39, 47, 61, 139, 154, 155, 158
Павловский В.В., 139
Парфёнов О.Е., 79, 87, 89
Пархоменко Ю.Н., 179
Пащенко А.С., 71
Пащенко О.С., 71
Перевалов А.А., 107
Пересторонин А.В., 149
Перко С.Л., 192
Петров М.Н., 57
Петров С.И., 69
Плеханов А.А., 163
Плиговка А.Н., 173
Подгорных С.М., 11
Позняк А.А., 105
Пономарев Д.С., 139, 155, 157
Порохонько Ю.А., 41
Прищепа С.Л., 83, 97, 169
Протасов Д.Ю., 63
Пушкарев С.С., 65, 125, 127, 141

– Р –

Ржеуцкий М.В., 69
Риль А.И., 27
Родионов Д.А., 25
Рыжук Р.В., 41, 49, 51, 113, 117, 131
Рындя С.М., 131, 135
Рябоштан Ю.Л., 187

– С –

Сабитов Д.Р., 194
Савельев А.П., 11
Салем М.А., 121
Самотаев Н.Н., 165
Сарайкин В.В., 125, 127
Сафаралиев Г.К., 131
Сафонов Д.А., 67
Сахаров А.В., 33
Свито И.А., 97
Селезнев Б.И., 57, 59, 181
Середин Б.М., 133
Сибирмовский Ю.Д., 185, 187
Сиглова Н.В., 131, 135
Сим П.Е., 33
Симакин С.Г., 133
Скасьирский Я.К., 189
Слаповский Д.Н., 39, 61
Слущинская И.А., 91
Смирнов Ю.Ю., 45
Смирнова М.О., 111
Смолович А., 171
Соболев А.С., 151, 153
Соколов И.С., 79, 87, 89
Солянкин П.М., 141, 143
Спектор И.Е., 139, 155
Стемпницкий В.Р., 85, 101
Сторчак В.Г., 79, 87, 89
Стриханов М.Н., 49, 187
Строгова А.С., 73
Султанов А.О., 131
Сысоева Н.В., 175

– Т –

Табулина Л.В., 95
Талденков А.Н., 79, 87, 89
Тамулевичюс С., 97
Тамулевичюс Т., 97
Тарелкин С.А., 111
Темпер Э.М., 37
Тимошенков А.С., 175
Тимошенков С.П., 175
Тихомиров С.А., 79
Токмачёв А.М., 79, 87, 89

Томош К.Н., 47
Торхов Н.А., 15, 17
Трофимов С.Д., 111
Туркин А.Н., 194

– У –

Усик Д.А., 43
Ушаков Д.В., 139

– Ф –

Федоров Д.Г., 57, 59
Фельшерук А.В., 97
Филаретов А.Г., 29
Фролов А.В., 171

– Х –

Хабибуллин Р.А., 137, 139, 153, 155, 157
Хмельницкий Р.А., 109
Хорошко Л.С., 99, 129

– Ц –

Цацульников А.Ф., 33
Цветков В.А., 109

– Ч –

Чалый В.П., 29
Червяков А.В., 194
Чернодубов Д.А., 55
Черняев А.П., 149
Чистяков А.А., 163
Чичков М.В., 179
Чубенко Е.Б., 81, 103

– Ш –

Шавров В., 171
Шаман Ю.П., 95
Шарков А.И., 109
Шелушинина Н.Г., 11
Шеляков А., 171

Шкуринов А.П., 141, 143
Шостаченко С.А., 41
Шубин В.В., 93

–Ю–

Ющенко Г.И., 63

–Щ–

–Я–

Щаврук Н.В., 139

Яговкина М.А., 33

Якунин М.В., 11

–Э–

Яроцкая И.В., 189

Ячменев А.Э., 139, 155, 157

Этрекова М.О., 165

Подписано в печать 06.05.2019. Формат 60×84 1/16.
Печ.л. 12,250. Тираж 130 экз. Заказ № 48.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ.*

115409, Москва, Каширское ш., 31