



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

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

25 мая 2016 года

МОСКВА

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

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

25 мая 2016 года

СБОРНИК ТРУДОВ

МОСКВА

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

Мокеровские чтения. 7-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 25 мая 2016 г.: сборник трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 160 с.

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

Материалы получены до 1 апреля 2016 г.

Сборник трудов издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2257-8

© *Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2016*

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРНОЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

БОНДАРЕНКО В.П.

Гетероэпитаксия полупроводниковых пленок на пористом кремнии 10
АЛЕЩЕНКО Ю.А., КРИВОБОК В.В., МУРАТОВ А.В., КЛЕКОВКИН А.В.,
МЕХИЯ А.Б.

Исследование перехода от непрямой к прямой запрещенной зоне
в эпитаксиальных слоях $Ge_{1-x}Sn_x$ 12

ПРОТАСОВ Д.Ю., ГУЛЯЕВ Д.В., БАКАРОВ А.К., ТОРОПОВ А.И.,
ЖУРАВЛЕВ К.С.

Повышение слабополевой и сильнополевой подвижности электронов
в гетероструктурах DA-pHEMT 14

ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С.

Влияние пространственно-неоднородных функциональных нанослоев
на процессы переноса в гетероструктурных квантовых ямах
на основе InGaAs с высокой электронной плотностью (обзор) 16

КОНЦЕВОЙ Ю.А., ЕНИШЕРЛОВА К.Л., КОЛКОВСКИЙ Ю.В.,
РУСАК Т.Ф., ГУСЕВ М.Е.

Электрические и оптические свойства гетероструктур AlGaIn/GaN 19

ВИНИЧЕНКО А.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., КАРГИН Н.И.

Электронные транспортные свойства и особенности роста
метаморфных гетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs
с содержанием InAs в квантовой яме до 100% 21

ТОРХОВ Н.А., БАБАК Л.И., КОКОЛОВ А.А., САЛЬНИКОВ А.С.,
ДОБУШ И.М., ШЕЕРМАН Ф.И.

Размерные эффекты в СВЧ-электронике 23

ГУДИНА С.В., АРАПОВ Ю.Г., САВЕЛЬЕВ А.П., НЕВЕРОВ В.Н.,
ШЕЛУШИНИНА Н.Г., ЯКУНИН М.В., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С.,
ВИНИЧЕНКО А.Н.

Квантовый эффект холла и прыжковая проводимость
в метаморфных наногетероструктурах n- InGaAs/InAlAs 25

ОВЕШНИКОВ Л.Н., НЕХАЕВА Е.И., АРОНЗОН Б.А.,
КУЛЬБАЧИНСКИЙ В.А.

Влияние топологии магнитной подсистемы на транспортные свойства
гетероструктур с дельта-слоем Mn 27

ВАСИЛЬЧЕНКО А.А.

Магические числа и осцилляции незатухающего тока в квантовых точках 29

КЛОЧКОВ А.Н., ГАЛИЕВ Г.Б., КЛИМОВ Е.А., ПУШКАРЕВ С.С.,
БУРЯКОВ А.М., МИШИНА Е.Д., ВАСИЛЬЕВ А.Л.

Кинетика релаксации неравновесных носителей заряда
в эпитаксиальных низкотемпературных пленках GaAs
на подложках GaAs с ориентацией (100) и (111)A 31

НИКИТОВ С.А., МАЛЫЦЕВ П.П., ГЕРГЕЛЬ В.А., ВЕРХОВЦЕВА А.В., ГОРШКОВА Н.М., ПАВЛОВСКИЙ В.В., МИНКИН В.С., ХАБИБУЛЛИН Р.А., КУЗНЕЦОВ А.Л. Импульсный терагерцовый генератор на базе мультибарьерной гетероструктуры $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$	33
--	----

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА:
ПРОИЗВОДСТВО, ТЕХНОЛОГИИ И СВОЙСТВА

ЦАЦУЛЬНИКОВ А.Ф., ЛУНДИН В.В., САХАРОВ А.В., ЗАВАРИН Е.Е., УСОВ С.О., НИКОЛАЕВ А.Е., ЗЕМЛЯКОВ В.Е., ЕГОРКИН В.И., ВОЛКОВ В.В., УСТИНОВ В.М. Транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе InAlN/GaN и AlGaIn/GaN гетероструктур	35
ЖУРАВЛЕВ К.С., МАЛИН Т.В., МАНСУРОВ В.Г., ЗЕМЛЯКОВ В.Е., ЕГОРКИН В.И., ПАРНЕС Я.М. А ₃ -N пассивированные гетероструктуры для E-HEMT	37
КУЛЯМИНА Д.А., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И. Влияние топологии на напряжение пробоя hemt на основе GaN	39
ГРУЗДОВ В.В., КОЛКОВСКИЙ Ю.В., МИННЕБАЕВ В.М. СВЧ микро-модули на основе GAN HEMT	41
ГРУЗДОВ В.В., ГЕРАСИМОВ А.О., МИННЕБАЕВ В.М., ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ А.В. Вопросы устойчивости ППМ на GAN к входной СВЧ мощности	43
АРУТЮНЯН С.С., КАГИРИНА К.А., ЛАВРУХИН Д.В., ГАМКРЕЛИДЗЕ С.А., ИВАНОВА Н.Е. Влияние гамма-излучения и термоэлектротренировки на характеристики СВЧ монокристаллических интегральных схем на основе гетероструктур AlGaIn/GaN	45
ОСИНСКИЙ В.И., ЛАБУНОВ В.А., МАСОЛ И.В., ГОРОХ Г.Г., ЛЯХОВА Н.Н., СУХОВИЙ Н.О. Si/3N нано приборы: второе пришествие кремния	47
ТОРХОВ Н.А., ФИЛИМОНОВА И.Д., НОВИКОВ В.А. Фрактальная проводимость омических контактов к гетероэпитаксиальным структурам AlGaIn/GaN	49
ТОРХОВ Н.А. Размерные эффекты в электрических характеристиках омических контактов к гетероэпитаксиальным AlGaIn/GaN HEMT-структурам.....	51
ПАВЛОВ А.Ю., ПАВЛОВ В.Ю., СЛАПОВСКИЙ Д.Н., КЛЕКОВКИН А.В., ФЕДОРОВ Ю.В. Исследование вжигаемой композиции омических контактов на основе Si/Al к AlGaIn/GaN гетероструктуре	53

ЛАВРЕНТЬЕВ К.К. Оптимизация параметров безмасочной нанолитографии затвора СВЧ транзистора с высокой подвижностью электронов.....	55
ЖЕЛАННОВ А.В., ФЕДОРОВ Д.Г., СЕЛЕЗНЕВ Б.И. Разработка технологии травления нитрида галлия в хлорсодержащей среде.....	57
БАКУН А.Д., ВАСИЛЬЕВА О.В., СИГЛОВАЯ Н.В., ЛЕБЕДЕВ С.С. Исследование технологии глубокого высокоскоростного травления карбида кремния в плазмохимическом процессе.....	59
ВЕСЕЛОВ Д.С., ВОРОНОВ Ю.А., ГАЙБУРА А.В. Автоматизированная установка жидкостного травления.....	61
ШОСТАЧЕНКО С.А., УСТЮГОВА А.В., ЗАХАРЧЕНКО Р.В., ЗЕБРЕВ Г.И., КАРГИН Н.И. Технология создания и характеристики транзистора с каналом на основе графена.....	63
ЗЕБРЕВ Г.И. Влияние поверхностных состояний и внешнего легирования на вольтамперные характеристики графеновых полевых структур.....	65
АЛЕКСАНИАН А.А., КАЗАКОВ И.П., КАРУЗСКИЙ А.Л., МИТЯГИН Ю.А., МУРЗИН В.Н., ПЕРЕСТОРОНИН А.В., ЦХОВРЕБОВ А.М., ШМЕЛЁВ С.С. Высокочастотные особенности транспорта в терагерцовых резонансно-туннельных двухбарьерных наноструктурах на основе GaAs/AlAs.....	67
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И СВЕРХРЕШЕТКИ, ДВУМЕРНЫЕ, ОДНОМЕРНЫЕ И НУЛЬМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ	
ЛУНИНА М.Л. Изопериодные гетероструктуры GaInP ₃ SbAs/InAs.....	69
БОГДАНОВ Е.В., КУБАШЕВСКИЙ Е.П., МИНИНА Н.Я. Влияние одноосного сжатия на поляризацию излучения лазерных диодов на основе p-AlGaAs/GaAsP/p-AlGaAs.....	71
ЯЧМЕНЕВ А.Э., БУГАЕВ А.С., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ПОНОМАРЕВ Д.С., ГАЛИЕВ Р.Р. Электронный транспорт в AlGaAs/InGaAs РНЕМТ наногетероструктурах с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова.....	73
СИБИРМОВСКИЙ Ю.Д., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н., ЕРЕМИН И.С., КОЛЕНЦОВА О.С., КАРГИН Н.И. Электронный транспорт в гибридной системе квантовая яма – квантовые кольца GaAs/AlGaAs.....	75
ПЛИГОВКА А.Н., ГОРОХ Г.Г. Металлооксидные сверхрешетки из самоорганизованных столбиковых наноструктур.....	77

ЧЕБОТАРЕВ С.Н., ИРХА В.А., ЕРИМЕЕВ Г.А., ЯЦЕНКО А.Н. Ионно-лучевая кристаллизация упругонапряженных наногетероструктур InAs-QD/GaAs	79
КОРЯКИН А.А., СИБИРЕВ, Н.В., ДУБРОВСКИЙ В.Г. Моделирование формирования осевых гетеропереходов в полупроводниковых нитевидных нанокристаллах групп АЗВ5, синтезируемых по механизму «пар-жидкость-кристалл»	81

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСИСТЕМ И ГЕТЕРОСТРУКТУР

МАЙБОРОДА И.О., ГРИЩЕНКО Ю.В., ЕЗУБЧЕНКО И.С., ЗАНАВЕСКИН М.Л., ПРЕСНЯКОВ М.Ю., ВАВИЛОВА Е.А. Влияние десорбции галлия на структуру и морфологию высокотемпературных слоев AlGaIn, полученных методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии	83
ЕЗУБЧЕНКО И.С., ГРИЩЕНКО Ю.В., МАЙБОРОДА И.О., ЗАНАВЕСКИН М.Л. Высококачественные слои AlN на подложках сапфира, полученные методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии	85
АВЕРЬЯНОВ Д.В., КАРАТЕЕВА К.Г., КАРАТЕЕВ И.А., ПРУЦКОВ Г.В., ПАРФЁНОВ О.Е., ТАЛДЕНКОВ А.Н., ТОКМАЧЁВ А.М., ВАСИЛЬЕВ А.Л., СТОРЧАК В.Г. Структура и свойства тонких пленок EuSi ₂ , эпитаксиально сопряженных с кремнием	87
ПУШКАРЁВ С.С., ГАЛИЕВ Г.Б., ГРЕХОВ М.М., КЛИМОВ Е.А., КЛОЧКОВ А.Н., КОЛЕНЦОВА О.С., ВАСИЛЬЕВ А.Л., ТРУНЬКИН И.Н. Эпитаксиальный рост плёнок InGaAs в низкотемпературном режиме на подложках InP (100) и (411)A	89
ГАЙДУК П.И. Термическое выращивание эпитаксиальных слоев SiC на пластинах кремния с SiGe буферами	91
СУЛТАНОВ А.О., СИГЛОВАЯ Н.В., САФАРАЛИЕВ Г.К., КАРГИН Н.И., ГУСЕВ А.С. Исследование процесса внедрения углерода в матрицу пористого кремния	93
ПАЩЕНКО А.С. Управляемое легирование наноразмерных полупроводниковых пленок в процессе ионно-лучевой кристаллизации	95
ГОРОХ Г.Г., ОСИНСКИЙ В.И., ЛОЗОВЕНКО А.А. Наноструктурированные темплетно-буферные слои на основе матриц анодного оксида алюминия для эпитаксиального роста пленок нитрида галлия	97

ДОЛГИЙ А.Л., БОНДАРЕНКО В.П. Формирование и структура пористых буферных слоев кремния для гетероэпитаксии полупроводниковых пленок на кремниевых подложках	99
ЛОЗОВЕНКО А.А., ГОРОХ Г.Г., ОБУХОВ И.А., СМЕРНОВА Е.А. Регулярные матрицы Al_2O_3 с нанопроводами InSb для перспективных устройств нанoeлектроники	101
ЗАХЛЕБАЕВА А.И., ГОРОХ Г.Г., ЖИЛИНСКИЙ В.В., БОГОМАЗОВА Н.В. Формирование и исследование матричных TiO_2/Vi_2O_3 наноструктур	103
МОСИН Д.А., КОВАЛЬЧУК Н.Г., LAZAUSKAS A., ЛАБУНОВ В.А., TAMULEVIČIUS S., ПРИЩЕПА С.Л., КОМИССАРОВ И.В. Влияние типа и концентрации растворителя меди на дефектность графена при переносе с поверхности катализатора на целевую подложку	105
ФЕЛЬШЕРУК А.В., КОВАЛЬЧУК Н.Г., ЛАБУНОВ В.А., ПРИЩЕПА С.Л., КОМИССАРОВ И.В. Зависимость параметров структуры графена синтезированного на поверхности медного катализатора методом ХПО при атмосферном давлении от времени синтеза	107
НИГЕРИШ К.А., КОВАЛЬЧУК Н.Г., ЛАБУНОВ В.А., БОНДАРЕНКО А.В., ШОСТАЧЕНКО С.А., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И., КОМИССАРОВ И.В. Статистические параметры линий спектров комбинационного рассеяния света подвешенного графена синтезированного методом ХПО	109
КОВАЛЬЧУК Н.Г., КОМИССАРОВ И.В., ЛАБУНОВ В.А., ГИРЕЛ К.В., КОРОЛИК О.В., ТИВАНОВ М.С., LAZAUSKAS A., TAMULEVIČIUS S., GRIGALIŪNAS V., MEŠKINIS Š., TAMULEVIČIUS T., ПРИЩЕПА С.Л. Синтез двухслойного графена с нарушенной АВ упаковкой методом ХПО при атмосферном давлении	111
МАТЮЩЕНКО И.А., КАЛОШИН М.М. Кластерные ионные пучки как новый метод получения сверхгладких подложек в технологии производства элементов нанoeлектроники	113
ПАВЛОВА Е.П., КАРГИН Н.И., ГУСЕВ А.С., РЫНДЯ С.М., ИЕШКИН А.Е. Планирование поверхности карбида кремния ускоренными кластерными ионами	115
ЗОТОВ А.О., ПЕРЕВАЛОВ А.А., САГУНОВА И.В. Особенности формирования модулированной по толщине диэлектрической пленки	117

НАНОМЕТРОЛОГИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

ЗАХАРЧЕНКО Р.В., ШОСТАЧЕНКО С.А., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И. Применение тонкопленочных резисторов для контроля температуры	119
ВЕСЕЛОВ Д.С., ВОРОНОВ Ю.А. Тестирование теплоизолирующих свойств и надежности МЭМС на кремнии	121

РУБАН О.А., АЛЕШИН А.Н., ЮЗЕЕВА Н.А.

Определение степени релаксации в барьерных слоях гетероструктур
AlGaN/GaN методом измерения вольт-фарадных характеристик 123

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

ГРОМОВ Д.В., ФИГУРОВ В.С., МАЛЬЦЕВ П.П., НИКИФОРОВ А.Ю.,
ТЕЛЕЦ В.А.

Влияние радиации на характеристики датчиков УФ-излучения
на основе природного алмаза 125

ХОДОРОВИЧ В.Г., ПЕВЦОВ Е.Ф., ГРУЗДОВ В.В., ГУСЕВ М.Е.

Исследование спектров фотолюминесценции
гетероструктур AlGaIn/GaN 127

АВАКЯНЦ Л.П., АСЛАНЯН А.Э., БОКОВ П.Ю., ВОЛКОВ В.В.,
КОГАН Л.М., ТУРКИН А.Н., ЧЕРВЯКОВ А.В., ЮНОВИЧ А.Э.

Особенности спектров электролюминесценции ультрафиолетовых
и фиолетовых светодиодов 129

ДМИТРИЕВ Д.В., ВАЛИШЕВА Н.А., ГИЛИНСКИЙ А.М.,
ЧИСТОХИН И.Б., ТОРОПОВ А.И., ЖУРАВЛЁВ К.С.

Разработка технологии СВЧ фотодиодов на основе InAlAs/InGaAs/InP
гетероструктур 131

ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЩАВРУК Н.В., ПАВЛОВ А.Ю., СЛАПОВСКИЙ Д.Н.,
ГАЛИЕВ Р.Р., ТОМОШ К.Н., ПОНОМАРЕВ Д.С., ЦЫРЛИН Г.Э.,
ЖУКОВ А.Е.

Разработка и изготовление терагерцового квантово-каскадного лазера
с двойным металлическим волноводом на основе многослойных
GaAs/AlGaAs гетероструктур 133

БЕЗОТОНСКИЙ В.В., КРОХИН О.Н., ОЛЕЩЕНКО В.А., ПЕВЦОВ В.Ф.,
ПОПОВ Ю.М., ЧЕШЕВ Е.А.

Пути повышения мощности лазерных диодов 135

ВОРОПАЕВ К.О., ИОНОВ А.С., СЕЛЕЗНЕВ Б.И.

Омические контакты для наногетероструктур вертикально
излучающих лазеров 137

ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н., СТРИХАНОВ М.Н.,
КАРГИН Н.И., КУЕСН Т., РОГАСКИ К., БОЛЬШАКОВА И.А.,
КОСТЬ Я.Я., МОРОЗ А.П., ШУРЫГИН Ф.М., ВАСИЛЬЕВ А.В.

Исследование полупроводниковых материалов для сенсоров магнитного
поля в сильных магнитных полях при криогенных температурах 139

ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., БОЛЬШАКОВА И.А., ГОЛЯКА Р.Л.,
КАРГИН Н.И., КОСТЬ Я.Я., СТРИХАНОВ М.Н., KUMADA M.,
ШУРЫГИН Ф.М., ВАСИЛЬЕВ А.В.

Сенсорный картограф магнитного поля для ускорителя
заряженных частиц 141

КРЫЛОВ И.В., ДРОЗДОВ К.А., ЧИЖОВ А.С., РУМЯНЦЕВА М.Н., ВАСИЛЬЕВ Р.Б., ФИЛАТОВА Д.Г., АБАКУМОВ А.М., ГАСЬКОВ А.М. Полупроводниковые газовые сенсоры на основе оксида цинка с квантовыми точками селенида кадмия	143
ВЕСЕЛОВ Д.С., ВОРОНОВ Ю.А. Расчёт конструкции акселерометра с высоким динамическим диапазоном	145
КЕШИН А.В., ЖИЛИНСКИЙ В.В., ЖАРСКИЙ И.М. Электрохимический синтез и электрооптические свойства полианилиновых пленок на $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ для устройств оптоэлектроники	147
КАТИН К.П., МАСЛОВ М.М., БОРИСОВА М.К., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И. К вопросу об устойчивости ковалентных комплексов CL-20	149
САУНИНА А.Ю., НИКИТЕНКО В.Р. Влияние микроскопических кулоновских взаимодействий на зависимость подвижности носителей заряда от концентрации в органических материалах	151
НИКИТЕНКО В.Р., АМРАКУЛОВ М.М. Теоретический анализ квазиравновесного транспорта носителей заряда в неупорядоченных органических материалах для условий эксперимента CELIV	153
Именной указатель авторов	156

**ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК
НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ**

**В.П. Бондаренко*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6,
e-mail: vitaly51@mail.ru

HETEROEPITAXY OF SEMICONDUCTOR FILMS ON POROUS SILICON

**V.P. Bondarenko*

Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics,
Republic of Belarus, 220013 Minsk, P. Brovki str. 6, e-mail: vitaly51@mail.ru

In the present work, a short review of research aimed at fabrication of heteroepitaxial films of compound semiconductors on silicon wafers using porous silicon buffer layer is presented. Beneficial effect of buffer porous silicon layers on PbS, ZnSe, PbSe, ZnO and GaAs is demonstrated. Advantages and disadvantages of porous silicon buffer layers are discussed.

Получение высококачественных гетероэпитаксиальных пленок на кремниевых подложках является актуальной, но сложной задачей из-за различия параметров решеток и термомеханических характеристик эпитаксиальной пленки и кремниевой подложки, что приводит к возникновению напряжений и дефектов в эпитаксиальных структурах. Одним из решений является использование буферных слоев, которые формируются на поверхности кремниевой подложки перед эпитаксией. Пористый кремний (ПК), формируемый методом анодирования, сохраняет кристаллическую структуру кремния, что делает возможным эпитаксиальный рост полупроводниковых пленок на поверхности ПК. Механические свойства ПК зависят от пористости и легко контролируются режимами анодирования. Можно формировать многослойные структуры, состоящие из слоев ПК различной толщины и пористости, причем границы между слоями можно делать как с резкими, так и с плавными изменениями пористости. Основная роль буферного слоя ПК заключается в компенсации механических напряжений при росте эпитаксиальной пленки и при последующих термических обработках эпитаксиальных структур.

Возможность эпитаксии кремния на ПК показана в 1972 г. [1] и на основе этого процесса была разработана ELTRAN технология производства высококачественных КНИ структур диаметром 300 мм. С середины 1980-х годов исследуются возможности использования ПК как буферного слоя

для гетероэпитаксии различных полупроводниковых материалов на кремниевых подложках. Эти исследования были начаты после публикации работы [2], в которой теоретически была показана возможность роста гетероэпитаксиальных пленок на так называемых “псевдокристаллических подложках” (подложки со структурированной поверхностью), к которым относится ПК. Были предприняты активные исследования по экспериментальной проверке теоретической модели [2] и гетероэпитаксиальные пленки различных материалов были выращены на буферных слоях ПК, что показало возможность их использования для конкретных приложений "псевдо-подложек" [3, 4].

Настоящий доклад представляет собой обзор результатов исследований, выполненных на кафедре микро- и нанoeлектроники БГУИР и посвященных гетероэпитаксии полупроводниковых пленок на буферных слоях ПК. В БГУИР пленки сульфида свинца и арсенида галлия на буферных слоях ПК были впервые изготовлены в 1994 г. Для осаждения пленок сульфида свинца использовался метод молекулярно-лучевой эпитаксии при температуре 365°C. Полученные пленки сульфида свинца характеризовались высоким структурным совершенством и были использованы для изготовления фотодетекторов инфракрасного диапазона с улучшенными характеристиками. Гетероэпитаксиальные пленки арсенида галлия были сформированы на буферных слоях ПК методом эпитаксии из металлорганических соединений. Благоприятное влияние буферного слоя ПК на кристаллическое совершенство было установлено для пленок селенида свинца, селенида цинка, оксида цинка. В ходе исследований были определены преимущества и недостатки буферных слоев ПК.

Несмотря на то, что буферные слои ПК пока не нашли широкого использования в изготовлении гетероэпитаксиальных структур, исследования в этом направлении целесообразно продолжать, поскольку процесс формирования ПК с заданными свойствами легко интегрируется в технологию микроэлектронного производства и на рынке оборудования уже появились высокопроизводительные установки для анодирования кремниевых пластин большого диаметра.

Литература

1. Y. Watanabe and T. Sakai, US Patent 3640806 (1972).
2. S. Luryi and E. Suhir, Appl. Phys. Lett. 49, 140 (1986).
3. R.S. Dariani, in: L. Canham (Ed.) Handbook of Porous Silicon. Springer International Publishing, Switzerland, 581 (2014).
4. E. Chubenko et al., in: G. Korotcenkov (Ed.) Porous Silicon. Vol.3. Taylor & Francis Group, 141 (2016).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА ОТ НЕПРЯМОЙ К ПРЯМОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ
ЗОНЕ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$**

*Ю.А. Алещенко^{1,2}, В.В. Кривобок¹, А.В. Муратов¹, *А.В. Клековкин¹,
А.Б. Мехия³*

¹Физический институт им. Лебедева РАН,
Россия, 123456, г. Москва, Ленинский проспект, 51, e-mail: aklekovkinbox@gmail.com

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: YAAleshchenko@mephi.ru

³Московский физико-технический институт (ГУ),
Россия, 141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9, e-mail: A_mehia@mail.ru

**STUDY OF THE TRANSITION FROM INDIRECT TO DIRECT GAP IN
EPITAXIAL LAYERS OF $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$**

*Yu. A. Aleshchenko^{1,2}, V.S. Krivobok¹, A.V. Muratov¹, *A.V. Klekovkin¹,
A.B. Mehia³*

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

²National research nuclear University «MEPhI»,
115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: YAAleshchenko@mephi.ru

³Moscow Institute of Physics and Technology (SU) 141700, Dolgoprudny,
9 Institutskiy per, e-mail: A_mehia@mail.ru

A set of four structures was grown on (001) Si/Ge virtual substrates by MBE. The molar fraction of Sn for different structures varied from 0.095 to 0.153. To determine the spectral position of the direct edge of self-absorption, we measured the photoluminescence spectra (PL) at room temperature and Infrared transmittance spectra at the helium temperature. The obtained data indicates that in the studied structures with a tin content of about 12–13% (by XRD) the direct edge of intrinsic absorption is in the region of 0.71–0.72 eV.

Твердые растворы GeSn рассматривают в качестве материала, перспективного для получения прямозонных полупроводников на основе элементов IVA группы периодической системы. Теория предсказывает достижение прямой структуры зон в образцах GeSn с мольной долей олова, превышающей 0.2[1]. Вследствие малого значения предела растворимости α -Sn в германии ($x = 0.005$), твердые растворы GeSn с мольной долей олова, представляющей практический интерес, могут быть получены только в далеких от термодинамического равновесия условиях. В данной работе была выращена серия Ge/GeSn гетероструктур на пластинах Si ориентации (001), покрытых буферным слоем германия толщиной 0.5– 1 мкм. Используются, как не отклоненные от точной ориентации, так

и отклоненные на угол 4° в направлениях [110] пластины. Толщина слоя GeSn изменялась от 5 до 20 нм, а покровный слой германия имел толщину 10 нм.

По данным рентгеновской дифракции, полученные нами эпитаксиальные слои $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ характеризуются упруго напряженным состоянием, а на разориентированных от (001) подложках, помимо тетрагональной деформации, претерпевают еще и моноклинную деформацию. Мольная доля Sn в слое изменялась от 0.095 до 0.153.

Для определения спектрального положения прямого края собственного поглощения, проводились измерения фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре.

Для пленки $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ с $x = 0.128$ толщиной 18 нм, выращенной на подложке Si (100) с отклонением на 0.5° к [110] при температуре подложки 131°C и температуре источника Sn 1000°C , зарегистрирована асимметричная полоса ФЛ с максимумом в районе 0.715 эВ. Полуширина полосы (40 мэВ) оказалась порядка тепловой энергии при комнатной температуре.

Спектральное положение максимума полосы заметно выше непрямого края собственного поглощения Ge и значительно ниже прямого края собственного поглощения данного материала. Таким образом, полосу в районе 0.715 эВ следует отнести к излучению из слоя GeSn, которое соответствует рекомбинации электронов и дырок, находящихся в окрестности Г-точки. Данная интерпретация подтверждена данными ИК пропускания при гелиевой температуре. Совокупность полученных данных, указывает на то, что в исследуемых структурах при содержании олова около 12÷13% (по рентгеновским данным) прямой край собственного поглощения расположен в районе 0.71–0.72 эВ.

Литература

1. S. Wirths, R. Geiger, N. and ect. Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si. Nature photonics, 9, 88 (2015).

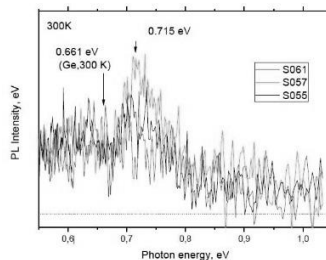


Рис. 1. Спектры ФЛ при комнатной температуре для структур

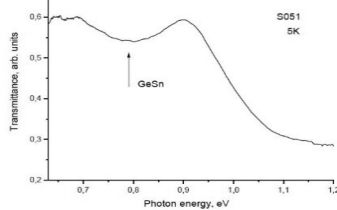


Рис. 2. Спектр ИК пропускания при гелиевой температуре для структур S057

ПОВЫШЕНИЕ СЛАБОПОЛЕВОЙ И СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ DA-pHEMT

**Д.Ю. Протасов^{1,2}, Д.В. Гуляев¹, А.К. Бакаров¹, А.И. Торопов¹, К.С. Журавлев^{1,3}*

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

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

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

THE ENHANCEMENT OF LOW-FIELD AND HIGH-FIELD ELECTRON MOBILITY IN DA-pHEMT HETEROSTRUCTURES

**D.Yu. Protasov^{1,2}, D.V. Gulyaev¹, A.K. Bakarov¹, A.I. Toropov¹, K.S. Zhuravlev^{1,3}*

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

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

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

The influence of δ -layer splitting on mobility of two-dimensional electron gas (2DEG) is analyzed for pHEMT heterostructures with donor-acceptor doping at low and high electric field. The low-field mobility calculations at low temperature (77 K) shows that the 2DEG mobility is limited by scattering on ionized donors, on deformation potential and on alloy disorders. The calculated enhancement of low-temperature mobility at δ -layer splitting is 12% and 25% for 1 nm and 2 nm δ -layers gap, respectively. The experimental values of mobility in such heterostructures with 2DEG density about $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ is higher than $6500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ and $20000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ for 300 K and 77 K, respectively. The drift velocity in electric field with intensity 10 kV/cm on 30% and 10% higher in splitting DA-pHEMT than in standard pHEMT or non-splitting DA-pHEMT, respectively.

Использование гетероструктур pHEMT с донорно-акцепторным легированием (DA-pHEMT) позволяет более чем на 50% увеличить удельную выходную мощность сверхвысокочастотных транзисторов [1]. В таких гетероструктурах концентрация двумерного электронного газа (ДЭГ) увеличена до $(4 \div 5) \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ без появления заметной паразитной проводимости по δ -слоям [2]. Для такого увеличения концентрации и формирования необходимой высоты барьеров концентрация легирующей примеси в донорных слоях должна достигать $(7 \div 8) \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что приводит к

снижению подвижности электронов до $5000\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ при комнатной температуре вследствие кулоновского рассеяния.

Для поиска путей увеличения подвижности был произведен расчет вкладов при низких температурах следующих механизмов рассеяния: кулоновского рассеяния на заряженных донорах и акцепторах, рассеяния на деформационном потенциале, рассеяния на неоднородностях сплава, пьезоэлектрического рассеяния, рассеяния на шероховатостях гетерограницы. Учитывалось заполнение двух первых подзон размерного квантования. Вклад неупругого рассеяния на полярных оптических фононах при $T=77\text{ К}$ был оценен в приближении равенства времени релаксации по импульсу характерному времени поглощения фонона.

Было получено, что подвижность ДЭГ при 77 К в основном определяется рассеянием на заряженных донорах, на деформационном потенциале и на неоднородностях сплава, а вклады остальных механизмов рассеяния пренебрежимо малы. Для уменьшения влияния доминирующего рассеяния на заряженных донорах было предложено разделить каждый из δ -слоев на два. Ближний к квантовой яме (КЯ) δ -слой предназначен для наполнения электронами квантовой ямы и концентрация доноров в нем примерно равна половине концентрации ДЭГ. Дальний от КЯ δ -слой предназначен для заполнения электронами акцепторных состояний и формирования тем самым дополнительного потенциального барьера в гетероструктуре DA-pHEMT. Расчет показывает, что расщепление на 1 нм или 2 нм δ -слоев, полуширина на полувысоте которых примерно равна 2 нм , приведет к увеличению общей подвижности на 12% и 25% , соответственно. В выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктурах DA-pHEMT с расщеплением 2 нм были получены для концентрации ДЭГ $4 \times 10^{12}\text{ см}^{-2}$ значения подвижности более $6500\text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ и $20000\text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ для 300 К и 77 К , соответственно.

С использованием импульсной методики были измерены полевые зависимости дрейфовой скорости в гетероструктурах pHEMT и DA-pHEMT. Анализ результатов таких измерений в приближении постоянства концентрации ДЭГ показал, что дрейфовая скорость в гетероструктуре DA-pHEMT с расщепленными δ -слоями при напряженности электрического поля 10 кВ/см на 30% и 10% выше по сравнению с pHEMT и DA-pHEMT.

Литература

1. В.М. Лукашин и др., Письма в ЖТФ, Т. 38(17), с. 84-89 (2012).
2. D.V. Gulyaev et al, J. Phys. D: Appl. Phys., 49(9), 095108 (2016).

**ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСЛОЕВ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА
В ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ НА ОСНОВЕ InGaAs
С ВЫСОКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ (ОБЗОР)**

**И.С. Васильевский*

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

**EFFECT OF SPATIALLY INHOMOGENEOUS FUNCTIONAL NANOLAYERS
ON ELECTRON TRANSPORT PROCESSES IN InGaAs-BASED HETEROSTRUCTURE
QUANTUM WELLS WITH HIGH ELECTRON DENSITY (A REVIEW)**

**I.S. Vasil'evskii*

National Research Nuclear University «MEPhI»,
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe highway 31, E-mail: ivasilevskii@mail.ru

A further improvement of InGaAs-based quantum well heterostructures with high electron density is discussed towards the quantum treatment of electron subbands states and electron transport processes in the real structures with functional nanolayers. Insertion of nanosized GaAs, AlAs and InAs layers into quantum well/spacer/barrier or applying a graded channel or barrier layers can enhance electron transport properties and gives a novel degree of freedom for the quantum structures design. The review and original study for PHEMT/GaAs, HFET/GaAs and InP HEMT structures are discussed.

Несмотря на доминирующее положение АЗВ5 гетероструктур с каналом InGaAs в промышленной СВЧ электронике, процессы переноса в HEMT структурах такого типа при высокой электронной плотности $1,5 \div 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ изучены далеко не полностью. Например, ввиду сложности зонного профиля многослойной HEMT гетероструктуры с квантовой ямой (КЯ) и поперечной локализацией электронов в подзонах двумерного электронного газа возникает ряд качественно новых явлений, таких как переходы горячих носителей тока в реальном пространстве [1], гибридизация электронных волновых функций [2] и др. Тенденция к повышению мощности СВЧ HEMT приборов, а также рост рабочей частоты требует, наряду с освоением других гетеросистем (например, GaN), дальнейшей оптимизации уже широко используемых гетероструктур с каналом InGaAs [3]. На наш взгляд, дальнейшая оптимизация InGaAs HEMT возможна за счет перехода к пространственно-неоднородным основным слоям гетероструктуры (таким как составная квантовая яма, спейсер, барьер и т.д.) При этом необходимо корректное квантовомеханическое описание

процессов многоподзонного электронного транспорта с учетом реального распределения электронной плотности в пространстве.

В настоящей работе приводится обзор состояния проблемы и результаты оригинальных исследований основных гетеросистем – PHEMT и HFET $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ на подложках GaAs, HEMT и PHEMT $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ на подложках InP. Пространственно-неоднородные слои состояли из бинарных соединений AlAs и GaAs, а нанослои градиентного состава – тройные соединения $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ и $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$.

Исследования показали, что рост импульса Ферми при увеличении электронной концентрации в HEMT структурах должен приводить к увеличению их подвижности. Обратный эффект, часто наблюдаемый в PHEMT с высокой электронной плотностью, обусловлен явлениями межподзонного рассеяния и гибридизации электронных волновых функций в сложной квантовой системе дельта-слой+канал с туннельно-проницаемым потенциальным барьером в спейсере, причем увеличение толщины спейсера приводит к «парадоксальному» снижению подвижности носителей тока [4].

Составной спейсер, содержащий нанобарьеры AlAs, позволяет в PHEMT КЯ с дельта-легированием Si через спейсер увеличить подвижности электронов в КЯ при высокой концентрации электронов $1 \div 3 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2}$. Эффект связан с подавлением туннельной связи состояний в реальном пространстве в КЯ и потенциальной яме дельта-слоя ионизированных доноров [4]. При этом добавление одного нанобарьера AlAs в спейсер не приводит к пространственному перераспределению электронной плотности. Добавление двух нанобарьеров AlAs, окружающих дельта-слой Si, приводит к вытеснению состояния из потенциальной ямы дельта-слоя доноров и увеличение электронной плотности в КЯ. Донорный слой AlAs с дельта-легированием в составе спейсера $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ позволяет достичь рекордных значений подвижности электронов, сравнимых с InP HEMT КЯ, однако, при этом эффективность активации доноров кремния оказывается малой.

В PHEMT КЯ с высокой электронной плотностью и двусторонним легированием Si компенсация изгиба дна КЯ за счет варизонного профиля состава $y_{\text{In}}(z)$ в $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ приводит к возрастанию электронной подвижности и концентрации, получено увеличение проводимости в КЯ на 25%. Максимальной подвижностью электронов обладает гетероструктура с таким распределением индия, которое обеспечивает наиболее прямоугольный результирующий потенциал квантовой ямы [5].

Использование в РНЕМТ КЯ варизонного барьера $Al_xGa_{1-x}As$ с линейным профилем состава $x_{Al}(z)$, компенсирующим сильное встроенное электрическое поле, позволяет снизить энергию туннелирующих из затвора электронов и уменьшить ток утечки затвора и негативные эффекты пробоя, вызванные ударной ионизацией, что особенно важно в структурах с неглубоко залегающей КЯ [6].

В составной квантовой яме HFET гетероструктуры $AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs$ нанослои GaAs служат переходными потенциальными барьерами. Оптимизация распределения доноров Si с дельта-легированием в нанослоях GaAs приводит к увеличению подвижности электронов и проводимости структуры [7]. Гетероструктуры данного типа сочетают преимущества НЕМТ и HFET конструкций и могут быть полезны для разработки мощных транзисторов и усилителей.

В составных КЯ $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_yGa_{1-y}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ на подложках InP нановставки InAs в канал и/или пристенки GaAs на гетерограницах КЯ выступают в качестве фононных барьеров, уменьшающих рассеяние горячих электронов за счет снижения коэффициента электрон-фононной связи, что приводит к увеличению дрейфовой скорости насыщения электронов [8-10]. Кроме того, использование двойных нановставок InAs обеспечивает снижение эффективной массы электронов одновременно с сохранением эффективной ширины КЯ L_w [11-12], поскольку в КЯ с одиночной нановставкой InAs наблюдается сильное снижение L_w .

Таким образом, функциональные нанослои-вставки бинарных полупроводников – AlAs, InAs и GaAs и нанослои неоднородного состава на основе твердых растворов $In_yGa_{1-y}As$ и $Al_xGa_{1-x}As$ с большим градиентом состава обеспечивают новую степень свободы в разработке конструкций квантовых наноструктур с высокой электронной плотностью, в т.ч. для транзисторных приложений.

Литература

1. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев и др., ФТП, т. 48, стр. 684 (2014).
2. И. С. Васильевский, В. А. Кульбачинский и др., ЖЭТФ, т. 132, стр. 197-199 (2007).
3. Р.А. Хабибуллин, Г. Б. Галиев, Е.А. Климов и др., ФТП, т. 47, стр. 1215-1220 (2013).
4. А.Н. Виниченко, В.П. Гладков, Н.И. Каргин и др., ФТП, т. 48, стр. 76-81 (2014).
5. И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко и др., ФТП, т. 48, стр. 1258-1264 (2014).
6. И. С. Васильевский, А.Н. Виниченко и др., Патент ПМ РФ №155420 от 27.11.2014.
7. Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский и др., ФТП, том 45, стр. 1373-1378 (2011).
8. А. Шиленас, Ю. Пожела, К. Пожела и др., ФТП, т. 47, стр. 348-352 (2013).
9. И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Ю.А. Матвеев и др., ФТП, т. 44, стр. 928-933 (2010).
10. K. Požela, J. Požela, V. Jucienė, Acta Physica Polonica A, vol. 119, №2, p. 170-172 (2011).
11. V.A. Kulbachinskii et al., Semicond. Science and Technology, vol. 27, p. 035021 (2012).
12. K. Požela, A. Šilėnas et al., Appl. Phys. A, Mat. Sci. & Processing, 12, p. 7039-7046 (2012).

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN**

**Ю.А. Концевой¹, К.Л. Енишерлова¹, Ю.В. Колковский¹, Т.Ф. Русак¹, М.Е. Гусев¹*

¹ОАО «НПП «Пульсар», Россия, 105187, Москва, Окружной проезд, дом 27,
e-mail: kontsevov@pulsarnpp.ru

**ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES
OF THE AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURES**

**Yu.A. Kontsevov¹, K.L. Enisherlova¹, Yu.V. Kolkovsky¹, T.F. Rusak¹, M.E. Gusev¹*

¹JSC «S&PE «Pulsar», Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27,
e-mail: kontsevov@pulsarnpp.ru

Distribution map for yellow luminescence area of AlGaN/GaN and GaN/AlGaN/GaN heterostructures grown on sapphire and silicon carbide substrates was built. It was found that at etching AlGaN layer in some areas of samples the value of yellow luminescence increases and becomes greater than in original plate. The relationship between the intensity of yellow luminescence and the dislocation density in heterostructures was revealed. It was found from the C-V characteristic measurements that at illumination plate by the rigid ultraviolet on boundaries of the heterostructure layers a negative charge occurred, that was removed only after prolonged exposure heterostructure for several days or additional heating.

В работах [1–3] дан обзор спектров люминесценции широкозонных нитридных материалов. Однако остается открытым вопрос, как может изменяться люминесценция при травлении слоя AlGaN гетероструктуры AlGaN/GaN, и как связана люминесценция с плотностью дислокаций в рассматриваемых гетероструктурах.

Для построения карт люминесценции гетероструктур использовалась методика, рассмотренная, в частности, в работе [4]. Кроме того необходимо было выяснить, как влияет облучение ультрафиолетовым светом с длиной волны 0,295 нм на электрические свойства гетероструктур, в частности, – на вольт-фарадные характеристики, при использовании которых можно определить, какие глубокие уровни возникают в гетероструктурах при облучении.

На рис.1 показана карта «желтой» фотолюминесценции (справа в верхней части рисунка) и картина плотности дислокаций (в центре). Из рис.1 следует, что максимальная фотолюминесценция наблюдается в об-

ласти минимальной плотности дислокаций. Дано объяснение причине возникновения этого эффекта.

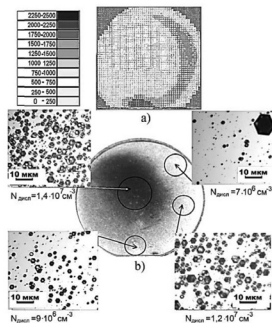


Рис. 1. Карта фотолюминесценции (а) и участки с различной плотностью дислокации (б)

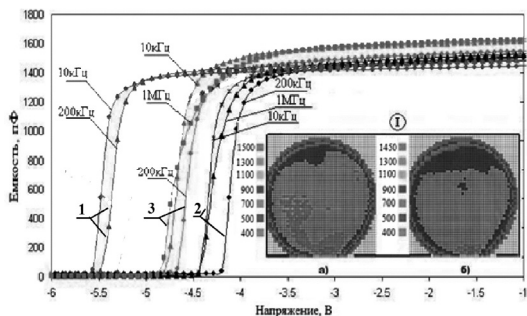


Рис. 2. C-V-характеристики: 1-до измерения карт фотолюминесценции; 2-после измерения карт фотолюминесценции; 3-после отжига пластины при 250°C (30 мин.). Врезка I – карта распределения интенсивности ЖЛ по площади пластины до отжига (а) и после отжига (б)

Показано, что при воздействии УФ облучения происходит сдвиг C-V-характеристик в сторону положительного смещения, рис. 2. Восстановление вида C-V характеристик требовало длительной выдержки или даже температурного воздействия.

Полученные экспериментальные результаты показали, что в гетероструктурах AlGaInN-GaN:

- дефекты, ответственные за возникновения ЖЛ при воздействии УФ, в основном локализованы на границе слоев AlGaInN-GaN, при этом максимальная локальная интенсивность ЖЛ может соответствовать областям структур с минимальной плотностью дислокаций;

- подтверждено наличие эффекта «памяти» у гетероструктур при воздействии ультрафиолета с изменением зонной диаграммы гетероструктур, причем это изменение может иметь длительный характер.

Литература

1. M.A. Reshchikov and H. Morkoç / J. Appl. Phys. 97, p. 061301-1 - 061301-95, (2005).
2. D.C. Reynolds, D. C. Look, B. Jogai et al /Solid State Commun. V. 106, p. 701, (1998).
3. H. Morkoç "Handbook of Nitride Semiconductors and Devices"/Wiley-VCH Verlag GmbH &Co. KGaA, V.2, p. 610-619. (2007).
4. Н.Б. Гладышева, В.В. Груздов, М.Е. Гусев и др. /Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции. М. ОАО «НПП «Пульсар», стр.119-122, (2015).

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ РОСТА
МЕТАМОРФНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР InAlAs/InGaAs/InAlAs
С СОДЕРЖАНИЕМ InAs В КВАНТОВОЙ ЯМЕ ДО 100%**

**А.Н. Виниченко, И.С. Васильевский, Н.И. Каргин*

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

**ELECTRON-TRANSPORT PROPERTIES AND EPITAXIAL GROWTH
OF InAlAs/InGaAs/InAlAs METAMORPHIC HETEROSTRUCTURES
WITH InAs CONTENT IN THE QUANTUM WELL UP TO 100%**

**A.N. Vinichenko, I.S. Vasilevskii, N.I. Kargin*

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

Epitaxial growth procedure was developed for InAlAs/InGaAs/InAlAs heterostructures with high InAs content in the quantum well (up to 100%). High electron mobility was obtained for the optimal composition and thickness values and growth parameters: substrate temperature and arsenic flux. It is observed that the cross-hatch surface, typical for metamorphic structures with high InAs content (>70%), for certain growth parameters transforms into a pattern of oriented threading dislocations.

Метаморфные гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InAlAs, эпитаксиально выращиваемые на подложках InP и GaAs, широко применяются в современной СВЧ электронике для создания малошумящих, быстродействующих транзисторов. Преимуществами данной системы материалов является возможность использовать слои с более высоким содержанием индия и, как следствие получать большой разрыв зоны проводимости на гетерогранице канал-барьер, а также меньшую эффективную массу электронов в квантовой яме (КЯ).

МНЕМТ гетероструктуры выращивались в наноцентре НИЯУ МИФИ методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs и InP на установке Ribber Compact 21-T. Все экспериментальные структуры содержали метаморфный буфер (ММБ) с линейно изменяющимся составом и имели одностороннее дельта-легирование кремнием (Si), кроме одной, у которой вместо дельта-слоя использовался объёмно-легированный кремнием InAlAs, толщиной 4.5 нм, с концентрацией доноров $0.95 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (№164). Тонкий покровный слой легировался для заполнения поверхностных состояний и дополнительного экранирования флуктуаций потенциала, что повышает концентрацию электронов и их подвижность в

канале. В таблице 1 представлены данные по составу буферного слоя (x_{In}) и КЯ (y_{In}), толщине КЯ (L_{qw}), а также электронные транспортные свойства экспериментальных образцов.

Таблица 1

№	Тип образца	x_{In} , %	y_{In} , %	L_{qw} , Å	T = 300 K		T = 77 K	
					n , 10^{12} см $^{-2}$	μ , см 2 /(В·с)	n , 10^{12} см $^{-2}$	μ , см 2 /(В·с)
110	МНЕМТ InP	82	85	135	0.32	14280	0.32	46320
155	МНЕМТ InP	81	90	140	0.73	13250	0.75	93460
158	МНЕМТ InP	81	100	115	0.71	16570	0.67	70720
164	md-МНЕМТ/InP	84	100	105	0.83	20500	0.71	128500

Структурная характеристика образцов проводилась методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и оптической микроскопии в режиме фазового интерференционного контраста. Выявлено, что характерный для метаморфных гетероструктур с высоким содержанием InAs (>70%) поперечно-полосатый рельеф поверхности (рис.1), при определенных значениях температуры подложки и потока мышьяка, может преобразоваться в процессе роста преимущественно одномерный (рис.2) рельеф. Это связано со сглаживанием поверхности в одном из направлений роста в верхних слоях ММБ с высоким содержанием InAs и в залечивающем слое. Предположительно, этот режим реализуется при не слишком низкой температуре, когда в приповерхностном слое отсутствуют остаточные напряжения, а длина диффузии адатомов индия достаточно велика. В структурах с высоким содержанием InAs в $In_xAl_{1-x}As$ такой режим возможен ввиду того, что длина поверхностной диффузии индия значительно превосходит длину диффузии атомов алюминия.

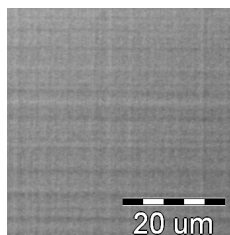


Рис. 1. Фазовый интерференционный контраст поверхности образца №155

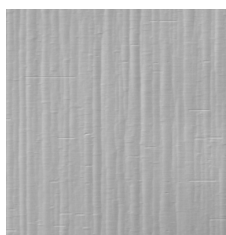


Рис. 1. Фазовый интерференционный контраст поверхности образца №164

РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКЕ

**Н.А. Торхов^{1,2}, Л.И. Бабак², А.А. Коколов², А.С. Сальников², И.М. Добуш²,
Ф.И. Шеерман²*

¹Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов АО «НИИПП»
Россия, 634034, г. Томск, Красноармейская 99 А, e-mail: trkf@mail.ru

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, Проспект Ленина, 40

DIMENSIONAL EFFECTS IN MICROWAVE ELECTRONICS

**N.A. Torkhov^{1,2}, L.I. Babak², A.A. Kokolov², A.S. Salnikov², I.M. Dobush², F.I. Sheerman²*

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

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Ave. 40

In most cases, heteroepitaxial structures in the local approximation at the nanoscale could be described in terms of fractal geometry of fractional dimension D_f . This leads to the semiconductor microwave electronics dimensional effects – non-linear dependence of the microwave performance of the linear dimensions of the active semiconductor devices construction.

Исследования показали, что в локальном приближении (при $L < 100$ мкм) электрофизические параметры гетероэпитаксиальных структур (например, неоднородность поверхностного потенциала $D_j(x; y)$ AlGaN/GaN HEMT-структур, рис. 1) удовлетворяют всем свойствам хаотических систем и могут быть описаны на языке фрактальной геометрии дробных размерностей D_f [1]. Для таких объектов значения их электрофизических характеристик нелинейно зависят от линейных размеров исследуемых областей (например, $W = n \times d$), что и приводит к появлению в полупроводниковой электронике, так называемых размерных эффектов – нелинейной зависимости СВЧ приборных характеристик от линейных размеров активных конструктивных элементов полупроводниковых приборов [1]. В случае линейных моделей такое поведение малосигнальных СВЧ приборных характеристик определяется нелинейным поведением параметров P_k элементов эквивалентных схем внутренних транзисторов (рис. 2, обведено пунктиром) значения которых (таб. 1) согласно (1) нелинейно зависят от линейных размеров W_k активных элементов полевых транзисторов (например, ширины канала d и количества секций n) [1]. Из таб. 1 хорошо видно, что вопреки закону Ома и правилам Кирхгофа транзисторы с одинаковой W , но разными d и n имеют разные значения пара-

метров P_k , преобразование которых друг в друга, согласно [1], хорошо подчиняется зависимости (1). Как было показано в [1], выражение (1) устанавливает связь параметров линейных моделей элементов P_k с фрактальной геометрией дробной размерности D_f гетероэпитаксиальной структуры. В общем случае предложенный подход позволяет решать комплекс задач по синтезу, анализу, проектированию, оптимизации конструкции, оптимизации и восстановлению параметров эквивалентных схем линейных и нелинейных моделей не только полевых транзисторов, но и других полупроводниковых устройств с нелинейными приборными характеристиками.

$$P_{k+1} = P_k \left(\frac{W_k}{W_{k+1}} \right)^{2D - D_f(n, \text{при } d = \text{Const})} \quad (1)$$

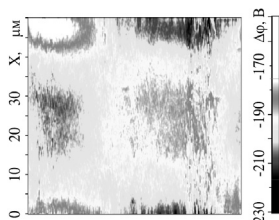


Рис. 1. Атомно-силовое изображение контактной разности потенциалов $Dj(x,y)$ AlGaIn/GaN НЕМТ-структуры с $D_f=1.7$

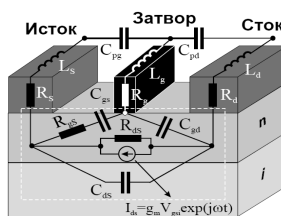


Рис. 2. Элементы внутреннего полевого транзистора линейной электрической эквивалентной схемы (пунктир)

Таблица 1

Значения P_k в зависимости от d и n , восстановленные с применением аналитических и оптимизационных методов экстракции из измеренных S-параметров

n	$d, \text{ мм}$	$W=n \times d, \text{ мм}$	$P_1 \equiv C_{ds}, \text{ пФ}$	$P_2 \equiv C_{gd}, \text{ пФ}$	$P_3 \equiv C_{gs}, \text{ пФ}$	$P_4 \equiv g_{\text{max}}, \text{ А/В}$	$P_5 \equiv R_{is}, \text{ Ом}$	$P_6 \equiv R_{ds}, \text{ Ом}$
4	50	200	0.107	0.0267	0.202	0.0405	6,42	1300
2	100	200	0.0736	0.0184	0.183	0.0391	6,82	696
8	50	400	0.175	0.0437	0.338	0.0678	2,85	482
4	100	400	0.160	0.0400	0.383	0.0802	4,36	557
12	100	1200	0.520	0.130	1,09	0.178	2,04	230
8	150	1200	0.452	0.113	1,54	0.233	3,48	164

Литература

1. N.A. Torkhov, L.I. Babak, A.A. Kokolov, A.S. Salnikov, I.M. Dobush, V.A. Novikov, I.V. Ivonin. Nature of size effects in compact models of field effect transistors. J. of Appl. Phys. 119, in press. (2016).

**КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА И ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ
В МЕТАМОРФНЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ n- InGaAs/InAlAs**

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

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, д.18, 620990, e-mail: svpopova@imp.uran.ru

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

**QUANTUM HALL EFFECT AND HOPPING CONDUCTIVITY
IN METHAMORPHIC n-InGaAs/InAlAs NANOHETEROSTRUCTURES**

**S.V. Gudina¹, Yu.G. Arapov¹, A.P. Saveliev¹, V.N. Neverov¹, S.M. Podgornykh¹,
N.G. Shelushinina¹, M.V. Yakunin¹, I.S. Vasil'evskii², A.N. Vinichenko²*

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

²National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoe shosse 31, Moscow, Russia, 115409

The longitudinal and Hall magnetoresistances of n-In_{0.85}Ga_{0.18}As/In_{0.82}Al_{0.82}As heterostructures were measured in the magnetic fields up to 9T at $T = (1.8 \div 30)$ K. The temperature-induced transport at the resistivity minima, corresponding to the quantum Hall plateaus, has been studied within the concept of hopping conduction in a strongly localized electron system. An analysis of variable-range hopping conductivity at the regions of the second, third and fourth quantum Hall plateaus provided an opportunity to determine the critical indices of the localization length.

Для описания температурно-индуцированной проводимости в области плато квантового эффекта Холла (в сильно локализованной системе электронов) используется представление о прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка, которая является доминирующей в пределе низких температур [1]. Для взаимодействующих электронов в 2D системе зависимость прыжковой проводимости от температуры дается выражением (1):

$$\sigma_{xx} = \sigma_0 \{ \exp - (T_0/T)^{1/2} \}, \quad (1)$$

с префактором $\sigma_0 \sim 1/T$. Характеристическая температура T_0 определяется кулоновской энергией и обратно пропорциональна длине локализации $\xi(v)$ для данного значения фактора заполнения v :

$$T_0(v) = C \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 k_B \xi(v)}, \quad (2)$$

где C – безразмерная константа порядка единицы, а ε – диэлектрическая проницаемость.

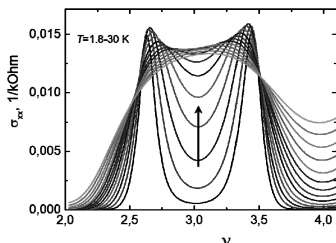


Рис. 1. (слева) Зависимости продольной компоненты тензора магнитопроводимости σ_{xx} от фактора заполнения при фиксированных температурах (стрелка показывает рост T)

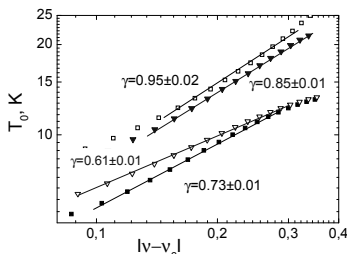


Рис. 2. (справа) Характеристическая температура T_0 как функция расстояния до критической точки $|\nu - \nu_c|$ с обеих сторон от переходов $2 \rightarrow 3$ (закрашенные квадраты – $\nu < \nu_c$, незакрашенные квадраты – $\nu > \nu_c$) и $3 \rightarrow 4$ (закрашенные треугольники – $\nu < \nu_c$, незакрашенные треугольники – $\nu > \nu_c$) в двойном логарифмическом масштабе. Значения γ (указаны возле кривых) определены согласно $\ln(T_0) \propto \gamma \ln|\nu - \nu_c|$ (сплошные линии)

наблюдаем режим прыжков по локализованным состояниям в хвостах уширенных уровней Ландау, вне полосы квантового туннелирования, то есть в области действия законов классического протекания.

Выполняя подгонку температурной зависимости σ_{xx} в области второго, третьего и четвертого плато квантового эффекта Холла (рис. 1) к выражению (1) для интервала температур $T=(1.8 \div 30)$ К, мы получили значения T_0 . Используя степенную расходимость длины локализации $\xi(E) = |E - E_c|^{-\gamma} = |\nu - \nu_c|^{-\gamma}$, когда энергия электронов E приближается к центру уровня Ландау ($E = E_c$), были получены критические индексы длины локализации γ (указаны возле кривых на рис. 2), значения которых не соответствуют универсальному $\gamma \cong 2.3$, предсказываемому теорией [2], однако, близки результату классической теории протекания для крупномасштабного примесного потенциала $\gamma = 4/3$.

Теоретические модели квантового туннелирования дают значение критического индекса $\gamma = 7/3 \cong 2.3$ в ближайшей окрестности критической энергии $E = E_c$ ($\nu = \nu_c$). С другой стороны, далеко от критической энергии зависимость ξ от $(E - E_c)$ (от $(\nu - \nu_c)$) определяется моделями классического протекания с $\gamma = 4/3$ [2]. Изучаемый нами режим прыжковой проводимости реализуется при достаточно большом удалении от центра уровней Ландау при $|\nu - \nu_c| > 0.1$. Поэтому вполне можно полагать, что мы

Литература

1. D.G. Polyakov and B.I. Shklovskii, Phys. Rev. B 48, 11 167 (1993).
2. B. Huckestein, Rev. Mod. Phys. 67, 367 (1995).

**ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ МАГНИТНОЙ ПОДСИСТЕМЫ
НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР
С ДЕЛЬТА-СЛОЕМ Mn**

* *Л.Н. Овешников^{1,2}, Е.И. Нехаева^{1,2}, Б.А. Аронзон^{1,2}, В.А. Кульбачинский^{1,3}*

¹НИЦ «Курчатовский Институт», 123182, Москва,
пл. Академика Курчатова, дом 1, e-mail: oveshln@gmail.com

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр., дом 53

³НИЯУ «МИФИ», 115409, Москва, Каширское ш., дом 1

**THE IMPACT OF MAGNETIC SUBSYSTEM TOPOLOGY ON TRANSPORT
PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES WITH Mn DELTA-LAYER**

* *L.N. Oveshnikov^{1,2}, E.I. Nehaeva^{1,2}, B.A. Aronzon^{1,2}, V.A. Kulbachinskiy^{1,3}*

¹NRC “Kurchatov Institute”, 123182 Moscow, pl. Kurchatova, 1, e-mail: oveshln@gmail.com

²P.N. Lebedev Physical Institute RAS, 119991 Moscow, Leninskiy prospekt, 53

³NRNU «MEPhI», 115409 Moscow, Kashirskoe highway, 31

Semiconductor systems with magnetic impurities have been thoroughly investigated for the last 15 years due to their great application potential in spintronics. Anomalous Hall effect (AHE) is a potentially useful probe of carrier spin polarization, although his nature is not fully understood nowadays. In this work we investigated AHE and transport properties of GaAs/InGaAs quantum wells with remote Mn δ -layer. We observed several similarities in the behavior of samples with drift and hopping regimes of conductivity appearing due to the presence of fluctuation potential in channel. It includes change of sign of magnetoresistivity (MR) upon cooling, appearance of MR oscillations and some others. We've experimentally observed the appearance of low-temperature AHE contribution related to nontrivial topology of magnetic subsystem and associated geometric (Berry) phase of carrier wave function. The evolution of magnetic layer topology also affects MR of samples.

Полупроводниковые системы с магнитной примесью крайне перспективны с точки зрения спинтронных приложений. Наиболее простым способом детектирования спиновой поляризации носителей заряда является наблюдение аномального эффекта Холла (АЭХ). Возникновение АЭХ связывается с нарушением T -симметрии, ввиду наличия магнитных моментов, в системах с сильным спин-орбитальным взаимодействием. В литературе представлено несколько механизмов, способных приводить к наличию конечного вклада в АЭХ. Поскольку холловский ток в дрейфовом режиме определяется иначе, чем при прыжковой проводимости, механизмы АЭХ в них также отличаются.

В данной работе были исследованы транспортные свойства квантовых ям GaAs/InGaAs, с пространственно-отделенным легирующим слоем Mn. Из-за неравномерного распределения Mn возникает крупномасштабный флуктуационный потенциал. В результате, в зависимости от концентрации носителей заряда, в канале могут возникать проводящие капли, проводимость между которыми становится прыжковой. Исследуя образцы с различным типом проводимости, удалось выделить некоторые схожие черты в их свойствах. Это включает в себя смену знака магнетосопротивления (МС) при охлаждении, появление осцилляции МС и наличие особенности на температурной зависимости сопротивления, связанной с переходом от локального упорядочения к состоянию с дальним магнитным порядком. Также экспериментально было обнаружено появление низкотемпературного вклада в АЭХ, связанного с возникновением нетривиальной топологии магнитной подсистемы и приобретением соответствующей геометрической фазы (фазы Берри) волновой функцией (ВФ) дырок в канале. Наличие этого вклада отчетливо видно на параметрических зависимостях аномальной компоненты холловского сопротивления от R_{xx} , как при дрейфовой, так и при прыжковой проводимости. Таким образом, эволюция состояния магнитного слоя отчетливо проявляется в транспортных свойствах исследуемых гетероструктур. За счет осциллирующего характера основных механизмов обмена, основное состояние с дальним магнитным порядком в этих системах не является строго коллинеарным. Поскольку в системе присутствуют также случайные флуктуации, топология такой системы является тривиальной. Нетривиальной топологией в данном контексте считается отклонение от коллинеарного направления соседних моментов неслучайным образом. Такое упорядочение возникает из-за взаимодействия Дзялошинского-Мории и становится устойчивым при понижении температуры. Известным примером нетривиальной топологии магнитной системы является образование скирмионов. За счет обмена, движение дырки в канале может сопровождаться поворотом её полного спина при взаимодействии с магнитными моментами примеси, что эквивалентно изменению фазы ВФ. Это приводит к появлению соответствующего топологического вклада в АЭХ. Другим следствием подобного упорядочения магнитных моментов может являться резкая зависимость отрицательного МС в малых полях, поскольку в данных структурах ОМС связывается именно с влиянием поля на магнитный слой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00446.

**МАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА И ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЗАТУХАЮЩЕГО ТОКА
В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ**

**А.А. Васильченко*

Кубанский государственный технологический университет,
Россия, 350072, Краснодар, Московская, дом 2, e-mail: a_vas2002@mail.ru

**MAGIC NUMBER AND PERSISTENT CURRENT OSCILLATIONS
IN QUANTUM DOTS**

**A.A. Vasilchenko*

Kuban State Technological University,
Russia, 350072, Krasnodar, Moskovskaya 2, e-mail: a_vas2002@mail.ru

We have used density functional theory to study the properties of a two-dimensional quantum dots in a perpendicular magnetic field. The system of Kohn-Sham equations for N two-dimensional electrons is self-consistently solved. It is shown that the dependence of the total angular moment of electrons from magnetic field represents a series of a plateau. The persistent current oscillations appear because the total angular moment of electrons M increases with increasing magnetic field. It is found that the period of persistent current oscillations is well described by the formula $\Delta B = 2B_1/(N+1)$, where B_1 corresponds to the middle of the plateau with total angular moment $M = N(N-1)/2 + N$.

В настоящем сообщении показана возможность возникновения осцилляций незатухающего тока при изменении магнитного поля в двумерных квантовых точках (КТ) со спин-поляризованными электронами. В квантовых кольцах осцилляции незатухающего тока возникают даже без учета взаимодействия между электронами. Совсем другая ситуация в КТ. Именно учет электрон-электронного взаимодействия приводит к осцилляциям незатухающего тока в КТ. Ранее в работах [1,2] найдено, что в КТ энергетический спектр электронов имеет некоторые особенности. В частности, основное и метастабильные состояния многоэлектронной системы в магнитном поле наблюдается только при определенных значениях полного углового момента электронов M . Эти значения полного углового момента названы магическими числами (МЧ). Автор работы [1] нашел, что МЧ для КТ с N электронами имеют период $\Delta M = N$. В дальнейшем [2] была найдена новая серия МЧ с периодом $\Delta M = N - 1$.

Исследования электронной структуры КТ в сильном магнитном поле проводились с помощью теории функционала плотности с учетом обмен-

ного взаимодействия в локальном приближении. Вычисления проводились для магнитных полей, при которых занят только нижний спиновый уровень Ландау. Удерживающий потенциал создается положительно заряженным фоном плотности n_p , не равным нулю при $r < R$. Для КТ с N электронами величина R находится из условия электронейтральности: $n_p \pi R^2 = N$.

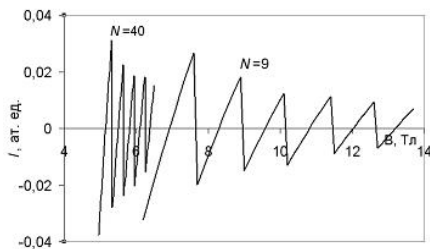


Рис. 1. Зависимость незатухающего тока I в квантовых точках с $N=9$ и 40 от магнитного поля ($n_p=10^{11}$ см $^{-2}$)

В одночастичном приближении наличие МЧ с периодом $\Delta M=N$ объясняется компактной конфигурацией электронов в пространстве углового момента. В дальнейшем предполагаем, что все электроны имеют компактную конфигурацию. Наличие магических чисел приводит к квантованию полного углового момента электронов, при этом зависимость $M(B)$ представляет собой серию плато углового момента электронов,

разделенных высотой N . Причем середины всех плато близки к прямопропорциональной зависимости от напряженности магнитного поля, поэтому получим для ширины плато:

$$\Delta B = 2B_1 / (N+1), \quad (1)$$

где B_1 соответствует середине первого плато для $M = N(N-1)/2 + N$. С изменением величины углового момента электронов следует ожидать изменение незатухающего тока в КТ. Результаты вычислений для GaAs КТ приведены на рис. 1. Период осцилляций незатухающего тока качественно описывается формулой (1). Отметим, что амплитуда осцилляций убывает с увеличением B . Период осцилляций уменьшается с увеличением N , однако период для потока $\Delta B \pi R^2$ слабо зависит от N .

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

Литература

1. P.A. Maksym, Physica B, **184**, 385 (1993).
2. C. Yannouleas, U. Landman, Phys. Rev. B, **70**, 235319 (2004).

**КИНЕТИКА РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛЕНКАХ GaAs
НА ПОДЛОЖКАХ GaAs С ОРИЕНТАЦИЕЙ (100) И (111)A**

**А.Н. Клочков¹, Г.Б. Галиев¹, Е.А. Климов¹, С.С. Пушкарев¹, А.М. Буряков²,
Е.Д. Мишина², А.Л. Васильев³*

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр.5, e-mail: klochkov_alexey@mail.ru
²ФГБОУВО "Московский технологический университет" (МИРЭА),
Россия, 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, e-mail: mishina_elena57@mail.ru
³НИЦ «Курчатовский институт», Россия, 123098, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1,
e-mail: a.vasiliev56@gmail.com

**RELAXATION KINETICS OF THE NONEQUILIBRIUM CARRIERS
IN LOW-TEMPERATURE GROWN EPITAXIAL GaAs FILMS ON (100)
AND (111)A GaAs SUBSTRATES**

**A.N. Klochkov¹, G.B. Galiev¹, E.A. Klimov¹, S.S. Pushkarev¹, A.M. Buryakov²,
E.D. Mishina², A.L. Vasiliev³*

¹Institute of ultrahigh frequency semiconductor electronics of RAS,
Russia, 117105, Moscow, Nagorniy proezd, 7, 5, e-mail: klochkov_alexey@mail.ru
²Moscow technological university (MIREA),
Russia, 119454, Moscow, Prospect Vernadskogo, 78, e-mail: mishina_elena57@mail.ru
³National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Russia, 123098, Moscow, Akademika Kurchatova Square, 1, e-mail: a.vasiliev56@gmail.com

The nonequilibrium carriers relaxation kinetics for the low-temperature grown GaAs films on the (100) and (111)A substrates were investigated in the pump-probe reflection experiment. The charged carriers lifetime is approximately 2 times less for (111)A substrates. The transmission electron microscopy images are compared for two types of used GaAs substrates.

Пленки GaAs, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при пониженной температуре роста 150÷300°C (low-temperature GaAs, LT-GaAs), используются для получения фотопроводящих антенн для генерации и детектирования терагерцового излучения [1]. Для оптимизации свойств пленок LT-GaAs и снижения времени жизни носителей заряда применяется легирование акцепторными примесями, например Be [2]. Ранее авторы доклада показали возможность получения слоев GaAs p-типа проводимости при высокотемпературной МЛЭ на подложках GaAs с ориентацией (111)A при легировании атомами Si [3].

В работе исследуется влияние низкотемпературных условий роста на свойства пленок LT-GaAs, легированных Si, на подложках (100) и (111)A. Образцы состоят из легированных или нелегированных Si пленок LT-GaAs толщиной 1 мкм, выращенных методом МЛЭ при 240°C на высокотемпературном (560°C) буфере из GaAs толщиной 0.2 мкм. Образцы под-

вергались высокотемпературному отжигу при 590°C в течение 1 ч. Исследование структуры образцов проводилось на просвечивающем растровом электронном микроскопе (ПЭМ) TITAN 80-300 (FEI, США) при ускоряющем напряжении электронов 300 кВ.

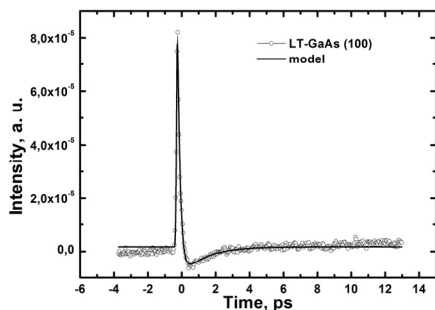


Рис. 1. Зависимость интенсивности отраженного луча зондирования от времени задержки для легированного LT-GaAs (100)

Для исследования кинетики релаксации неравновесных носителей заряда измерялся коэффициент отражения пленок LT-GaAs как функция разности времени задержки между импульсами накачки и зондирования (метод pump-probe). В качестве источника лазерного излучения использовался твердотельный Ti:Sa лазер с длиной волны 800 нм и длительностью импульса 100 фс. Кривые релаксации сигнала отражения (см. рис. 1)

обычно состояли из двух участков: быстрая релаксация со временем $\sim 0.15 \div 0.5$ пс (в зависимости от образца), которая связана с захватом фотовозбужденных электронов на ловушки в LT-GaAs, и более длительная релаксация со временем $1.5 \div 10$ пс, которая связана с рекомбинацией электронов на ловушках. Для ряда образцов на подложках (100) и (111)A наблюдается задержанный сигнал фотоотражения со временем спада более 50 пс.

С помощью ПЭМ установлено, что LT-GaAs структуры на подложках GaAs (111)A являются более дефектными, чем на GaAs (100). Монокристаллический слой LT-GaAs на (111)A растёт до толщины 200 нм, а при больших толщинах слой становится поликристаллическим, что не наблюдается для LT-GaAs (100). На снимках ПЭМ пленок LT-GaAs после отжига обнаружено образование преципитатов мышьяка. Преципитаты имеют средний диаметр 10 нм и распределены хаотично в нелегированных и объемно-легированных структурах. При введении в LT-GaAs δ -слоёв Si происходит упорядочивание преципитатов и их аккумуляция вблизи δ -слоёв.

Литература

1. E.A.P. Prieto et al., J. Opt. Soc. Am. B **31** (2), 291 (2014).
2. M.Haiml et al. Appl. Phys. Lett. **74**, 1269 (1999).
3. G.B. Galiev et al. // Sem. Sci. Tech. **17** (2), 120 (2002).

**ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ГЕНЕРАТОР НА БАЗЕ МУЛЬТИБАРЬЕРНОЙ
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$**

*С.А. Никитов¹, П.П. Мальцев², *В.А. Гергель¹, А.В. Верховцева¹,
Н.М. Горшкова¹, В.В. Павловский¹, В.С. Минкин¹,
Р.А. Хабидуллин², А.Л. Кузнецов²*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники РАН,
Россия, 125009, г.Москва, ул. Моховая 11, корпус 7, e-mail: gorshkovan@bk.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Россия, 117105, г.Москва, Нагорный проезд, дом 7, строение 5

**PULSED TERAHERTZ GENERATOR BASED MULTIBARRIER
HETEROSTRUCTURES $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$**

*S.A. Nikitov¹, P.P. Maltsev², *V.A. Gergel¹, A.V. Verhovtseva¹, N.M. Gorshkova¹,
V.V. Pavlovskij¹, V.S. Minkin¹, R.A. Khabibullin², A.L. Kuznecov²*

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

²Institution of Russian academy of sciences Institute of UHF semiconductor electronics of RAS,
Russia, 117105 Moscow, Nagorny passage 7, p. 5

Designed and manufactured semiconductor device (mock) that generates microsecond pulses of electromagnetic radiation in the terahertz frequency range. Its main element has a seven or nine barriers of heterostructure $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$, grown by molecular beam epitaxy on a plate highly conductive GaAs.

Разработано и изготовлено полупроводниковое устройство (макет), генерирующее микросекундные импульсы электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот. Его основным элементом являются семи- или девятибарьерная гетероструктура $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$, выращенная методом молекулярно-пучковой эпитаксии на пластине высокопроводящего GaAs. Она содержит толстый (около 1 мкм) слой высоколегированного GaAs ($N=10e17 \text{ см}^{-3}$), который выполняет роль тылового электрического контакта. Затем на этот контактный слой последовательно были нанесены перемежающиеся слои нелегированного $Al_xGa_{1-x}As$ и высоколегированного ($N_d=10e18 \text{ см}^{-3}$) GaAs одинаковой толщины (40 нм). Относительное содержание алюминия в основных центральных барьерных слоях гетероструктуры было выбрано равным одной четвертой ($x=0,25$), а в дополнительных, разогревающих электроны крайних барье-

рах, концентрация алюминия составляла в два раза меньшую величину ($x = 0,125$). Толщина завершающего верхнего слоя, легированного GaAs была выбрана равной 0,3 мкм для безопасного нанесения последующего металла. После эпитаксии на пластине методом жидкостного травления формировались меза-столбики диаметром 20 мкм. Глубина соответствующего травления достигала нижнего контактного слоя GaAs. Далее, в центре меза-столбика, формировалась омическая контактная площадка диаметром 10 мкм и, одновременно такая же омическая кольцевая площадка шириной 10 мкм, отстоящая от края меза-столбика на 5 мкм. После этого на структуру наносился первый слой металлизации, который затем покрывался изолирующим слоем SiO_2 толщиной 0,5 мкм. После вскрытия соответствующих окон в диэлектрике все это покрывалось верхним слоем металлизации, в котором соответствующей фотолитографией формировалась резонансная антенная структура, топология которой представляла собой два полуволновых отрезка полосковых линий той же ширины, соединенных между собой и с активным меза-столбиком более узкими четвертьволновыми шлейфами шириной 20 мкм. Отметим, что эти резонансные элементы одновременно шунтируют по высокой частоте высокое выходное сопротивление источника питания «выставляющего» требуемую рабочую точку на участке отрицательного сопротивления S-образной характеристики активной меза-гетероструктуры.

Наблюдаемая S-образная ВАХ образцов обусловлена термоинжекционной неустойчивостью, когда джоулев разогрев электронов стимулирует термоинжекцию через энергетические барьеры. В рассматриваемой гетероструктуре дрейфовый процесс происходит в режиме нелокального энергобаланса, когда электроны нагреваются в нелегированных барьерных слоях, в которых сосредотачивается высокое электрическое поле и охлаждаются в прилегающих сильно легированных GaAs слоях, электрическое поле в которых сравнительно мало. При этом определенная часть потока электронного тепла достигает следующего энергетического барьера и стимулирует термоинжекцию электронов через этот барьер в следующую GaAs потенциальную яму. Именно для компенсации этого эффекта электрическое поле в барьерах уменьшается в определенном диапазоне нарастания тока. Несмотря на отмеченную нелокальность, средняя джоулева энергия переходит в кристаллическую решетку, приводя к соответствующему разогреву всего образца. Электрическое питание прибора осуществлялось микросекундными токовыми импульсами с частотой повторения порядка 1 КГц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках Соглашения 14.607.21.0141 от 27 октября 2015 г.

**ТРАНЗИСТОРЫ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ОСНОВЕ InAlN/GaN И AlGaN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУР**

**А.Ф. Цацульников^{1,2}, В.В. Лундин^{1,2}, А.В. Сахаров^{1,2}, Е.Е. Заварин^{1,2},
С.О. Усов¹, А.Е. Николаев^{1,2}, В.Е. Земляков³, В.И. Егоркин³, В.В. Волков⁴, В.М. Устинов¹*

¹НТЦ Микроэлектроники РАН, 194021, г. С.-Петербург,
Политехническая ул., дом 26, e-mail: guseva@mail.ioffe.ru

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Россия, 194021, г. С.-Петербург, Политехническая ул., дом 26,
e-mail: post@mail.ioffe.ru

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Россия, 124498, Зеленоград, Москва, 4806, д.5, e-mail: netadm@miee.ru

⁴ЗАО «Светлана-Электронприбор»,
Россия, 194156, г. С.-Петербург, Проспект Энгельса, дом 27,
e-mail: svetlana@svetlanajsc.ru

**TRANSISTORS WITH HIGH ELECTRON MOBILITY BASED
ON InAlN/GaN AND AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURES**

**A.F. Tsatsulnikov^{1,2}, W.V. Lundin^{1,2}, A.V. Sakharov^{1,2}, E.E. Zavarin^{1,2}, S.O. Usov¹,
A.E. Nikolaev^{1,2}, V.E. Zemlyakov³, V.I. Egorkin³, V.V. Volkov⁴, V.M. Ustinov¹*

¹Submicron Heterostructures for Microelectronics Research
and Engineering Center RAS
Russia, 194021 St.Petersburg, Politeknicheskaya str. 26, e-mail: guseva@mail.ioffe.ru

²Ioffe Institute, Russia, 194021 St.Petersburg, Politeknicheskaya str. 26,
e-mail: post@mail.ioffe.ru

³National Research University of Electronic Technology (MIET)
Russia, 124498, Zelonograd, Moscow, 4806, д.5, e-mail: netadm@miee.ru

⁴JSC «Svetlana-Electronpribor»
Russia, 194021 St.Petersburg, Engels av. 27, e-mail: svetlana@svetlanajsc.ru

The results of development of high electron mobility transistors (HEMT) based on InAlN/GaN and AlGaN/GaN heterostructures, grown by metal-organic chemical vapour deposition on sapphire and SiC substrates having sizes 2", 3" and 100 mm, are presented. Electron concentration of $2.8\text{--}3.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ($1.3\text{--}1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) and mobility of $750\text{--}850 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ($>2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) in the InAlN/GaN (AlGaN/GaN) heterostructures were demonstrated. The possibility to improve the characteristics of HEMTs by using *in-situ* passivation by Si₃N₄ layer was revealed. The transistors with saturation current of 1600 mA/mm (800 mA/mm) and transconductance of 200 mS/mm (220 mS/mm) for InAlN/GaN (AlGaN/GaN) heterostructures were demonstrated.

Традиционно для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) используются решеточно-несогласованные гетероструктуры AlGaIn/GaN, в которых канал формируется на интерфейсе барьерного AlGaIn и буферного GaN слоев как за счет разницы коэффициентов спонтанной поляризации, так и пьезоэлектрической поляризации, возникающей за счет деформации. Увеличение подвижности и концентрации носителей заряда в HEMT гетероструктурах AlGaIn/GaN для получения максимальных выходных характеристик требует повышения содержания алюминия и изменения толщины барьерного слоя. Увеличение состава или толщины слоя AlGaIn приводит к росту упругих напряжений, что приводит к снижению качества получаемого материала, что в свою очередь, вызывает ухудшение параметров и срока службы транзисторов. Использование слоя InAlN вместо AlGaIn в качестве барьерного слоя в HEMT структурах в теории позволяет создавать как решеточно-согласованные гетероструктуры не содержащие упругих напряжений, так и гетероструктуры с управляемыми напряжениями.

В работе проведены исследования дизайна и технологии эпитаксиального роста гетероструктур InAlN/GaN и AlGaIn/GaN для HEMT транзисторов на подложках синтетического корунда и отечественных подложках SiC. Для эпитаксиального роста использовалась отечественная установка МОС-гидридной эпитаксии Dragon-125. Исследования проводились с использованием подложек диаметром 2", 3" и 100 мм. Было показано, что вплоть до подложек диаметром 100 мм удается реализовать высокую однородность электрофизических параметров по поверхности пластины со среднеквадратичным отклонением 1-2%. Проведенные исследования позволили реализовать высокие значения концентрации и подвижности носителей в канале InAlN/GaN (AlGaIn/GaN) гетероструктур, составляющие, соответственно, $2,8 \div 3,1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ($1,3 \div 1,4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$) и $750 \div 850 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{сек}$ (более $2000 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$ при использовании подложек SiC). На основе отобранных InAlN/GaN (AlGaIn/GaN на отечественном SiC) гетероструктур были созданы тестовые полевые транзисторы, обладающие высокими токами насыщения 1600 мА/мм (800 мА/мм) и крутизной 200 мС/мм (220 мС/мм). Показано, что использование *in-situ* пассивации слоем Si₃N₄ позволяет улучшить параметры приборов. На транзисторах, изготовленных из структур, выращенных на отечественных подложках SiC, достигнута выходная мощность 9 Вт на частоте 3 ГГц.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о субсидии № 14.607.21.0003 от 05.06.2014, уникальный код проекта: RFMEFI60714X0003).

**A₃-N ПАССИВИРОВАННЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ
ДЛЯ E-HEMT**

**К.С. Журавлев¹, Т.В. Малин¹, В.Г. Мансуров¹, В.Е. Земляков², В.И. Егоркин²,
Я.М. Парнес³*

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

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Россия, 124498, г.Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: vzml@rambler.ru

³ЗАО «Светлана-Электронприбор»,
Россия, 194156, г.Санкт-Петербург, пр. Энгельса, дом 27, e-mail: jmparnes@gmail.com

**A₃-N PASSIVATED HETROSTRUCTURES
FOR E-HEMT**

**K.S. Zhuravlev¹, T.V. Malin¹, V.G. Mansurov¹, V.E. Zemlyakov², V.I. Egorkin²,
Ya.M. Parnes³*

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Institution
of Russian Academy of Sciences

¹Russian Federation, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev avenue 13,
e-mail: zhur@isp.nsc.ru

²National Research University of Electronic Technology «MIET»,
Russian Federation, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin Square 1, e-mail: vzml@rambler.ru

³CJSC «Svetlana-Electronpribor»
Russian Federation, 194156, Saint Petersburg, Engels avenue 27, e-mail: jmparnes@gmail.com

MBE technology of *in situ* passivated SiN/AlN/GaN heterostructures with ultra-thin AlN barrier has been developed. Enhancement-mode HEMTs with a 0.6- μm gate length are demonstrated. The HEMTs exhibit a maximum drain current of 1 A/mm, a saturation voltage of 1 V, a maximum transconductance of 350 mS/mm, a breakdown voltage of 60 V. The gate lag and drain lag effects are negligibly small for these transistors.

В настоящее время значительные усилия технологов направлены на создание нитрид галлиевых транзисторов с индуцированным каналом (enhanced mode HEMT). Данные транзисторы могут быть использованы в цифровых интегральных схемах и устройствах силовой электроники. Одним из перспективных направлений получения E-HEMT является использование AlN/GaN гетероструктур (ГЭС) со сверхтонким барьером [1,2]. В работе продемонстрирована возможность получения E-HEMT на основе AlN/GaN ГЭС, пассивированных пленкой SiN сразу после выращивания гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

AlN/GaN ГЭС выращивались на подложках сапфира ориентации (0001) в аммиачной МЛЭ установке типа CBE Riber. ГЭС состояли из

барьерного слоя AlN толщиной около 4 nm, слоя GaN толщиной 1,5 μm и буферного слоя AlN толщиной около 300 nm. Атомное строение границ раздела и особенности морфологии AlN/GaN ГЭС изучались методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и спектроскопии тонкой структуры поглощения рентгеновских лучей (EXAFS-спектроскопия). Подвижность двумерных электронов в SiN/AlN/GaN ГЭС при комнатной температуре составляла $\mu = 1200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ при концентрации электронов $n_e = 1,1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Ультратонкое покрытие поверхности ГЭС нитридом кремния толщиной около 1 nm осуществлялось непосредственно в камере роста установки МЛЭ.

На основе выращенных ГЭС, методом оптической литографии были сформированы полевые транзисторы с затвором Шоттки. Длина затвора (L_g) составила 0,6 μm , а ширина затвора варьировалась от 50 до 400 μm . Закрытые транзисторы получились за счет конструкции гетероструктуры, обеспечившей необходимую близость канала транзистора к затвору. В полученных транзисторах исследовались низкочастотные и СВЧ-характеристики. Удельная крутизна E-HEMT достигала значения 350 $\mu\text{S}/\text{mm}$, пробивное напряжение 60 V. Коллапс тока E-HEMT составил $\sim 2\%$. Максимальная частота усиления, вычисленная экстраполяцией однонаправленного коэффициента усиления, составила $\sim 32 \text{ GHz}$.

В работе представлены результаты разработки МЛЭ технологии SiN/AlN/GaN гетероструктур со сверхтонким барьером, пассивированными в камере роста. На выращенной ГЭС сформированы нормально закрытые транзисторы. E-HEMT получены за счет конструкции ГЭС, обеспечившей необходимую близость канала транзистора к затвору. Крутизна E-HEMT с шириной затвора 200 μm составила 350 mS/mm , пробивное напряжение 60 V. Определена граничная частота усиления по току $f_T \sim 13 \text{ GHz}$. Показано практическое отсутствие токового коллапса транзистора.

Работа поддержана грантами РФФИ 16-29-03311, 16-32-00765, 16-32-00773.

Литература

1. David A. Deen, David F. Storm, David J. Meyer, Robert Bass, Steven C. Binari, Theodosia Gougousi, and Keith R. Evans. // Applied Physics Letters. 2014. V. 105. 093503.
2. Nicolas Herbecq, Isabelle Roch-Jeune, Nathalie Rolland, et al. // Applied Physics Express.

**ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ НЕМТ
НА ОСНОВЕ GaN**

**Д.А. Кулямина¹, Р.В. Рыжук¹, Н.И. Каргин¹*

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

**THE INFLUENCE OF THE TOPOLOGY ON THE BREAKDOWN VOLTAGE
OF GaN HEMT**

**D.A. Kulyamina¹, R.V. Ryzhuk¹, N.I. Kargin¹*

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

In this work we have studied the influence of the topology GaN HEMT on breakdown voltage of transistor. Heteroepitaxial GaN HEMT structures on sapphire substrates with a diameter of 2 inches were grown by molecular beam epitaxy (MBE) in the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics. On the basis of heterostructure was formed a number of transistors, which differ from each other by a distance gate-drain. The distance between the contacts of gate and drain was 5, 10, 15 and 20 μm respectively. To increase the breakdown voltage was also created a metallization «field plate».

We have determined if the distance of the gate-drain contacts increase in the interval of up to 10 microns then the breakdown voltage of transistor increase too. It was demonstrated that dependence of the breakdown voltage of transistor is a linear plot in the interval of length of the "field plate" value from 0 to 1 μm . After them is the saturation region.

The study was supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation on agreement #14.578.21.0062 dated 20.10.2014 (unique identification number of the work is RFMEFI57814X0062).

Широкозонный полупроводниковый материал нитрид галлия (GaN) обладает уникальными физическими свойствами, позволяющими создавать на его основе твердотельные приборы силовой и СВЧ-электроники, стойкие к воздействию высокой температуры и радиации. Благодаря этим качествам GaN приборы находят применение в самых различных областях промышленности: источниках питания, СВЧ электронных приборах, мощных силовых приводах, радиолокационных станциях, системах спутниковой связи, контроллеры энергетических систем и многое другое.

Одним из основных направлений развития мощной и силовой электронной компонентной базы является увеличение напряжения пробоя.

При этом планарная конструкция прибора позволяет повысить время его переключения по сравнению с вертикальной структурой. Такой прибор способен коммутировать сотни вольт в секунду, что позволяет использовать его в небольших прецизионных силовых конвертерах. Кроме этого увеличение частоты коммутации транзистора позволяет снизить размеры индуктивных элементов инверторов [0].

В настоящей работе проведено исследование влияния напряжения пробоя от топологии транзистора. Гетероэпитаксиальные НЕМТ структуры GaN на подложках сапфира диаметром 2 дюйма были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в Институте физики полупроводников СО РАН. Подвижность носителей в канале составила $\sim 1800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, концентрация $\sim 1,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Оцененная плотность прорастающих дислокаций, выходящих на поверхность гетероструктуры, составила величину $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, что соответствует мировым показателям ($10^9 \div 10^{10} \text{ см}^{-2}$) для нитрид-галлиевых гетероструктур, полученных методом МЛЭ. Регулярные кристаллические плоскости в различных слоях гетероструктуры свидетельствуют о приемлемом качестве гетероэпитаксиальных слоев.

На основе полученных гетероструктур был сформирован ряд транзисторов, отличающихся друг от друга расстоянием затвор-сток. Расстояние между контактами затвора и стока составили 5, 10, 15 и 20 мкм соответственно. Увеличение этого расстояния позволяет с одной стороны увеличить область обедненного заряда, способствуя увеличению напряжения пробоя, с другой стороны приводит к уменьшению времени переключения прибора. Кроме этого для увеличения пробивного напряжения также использовалась двухуровневая металлизация «field plate» [0].

Построены зависимости напряжения пробоя от вариаций параметров структуры. Установлен близкий к линейному рост напряжения пробоя при увеличении расстояния затвор-сток в интервале до 10 мкм. Показано, что зависимость напряжения пробоя от длины полевой платы содержит линейный участок в интервале от 0 до 1 мкм, сменяющийся после этого областью насыщения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57814X0062).

Литература

1. E. Bahat-Treidel, «GaN-Based HEMTs for High Voltage Operation Design, Technology and Characterization» (2012).
2. Vassil Palankovski, Stanislav Vitanov, Advanced Materials and Device Analysis Group, Inst. for Microelectronics (2006).

СВЧ МИКРО-МОДУЛИ НА ОСНОВЕ GAN HEMT

*В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, *В.М. Миннебаев*

ОАО «НПП «Пульсар»,
Россия, 105187, Москва, Окружной проезд, дом 27, e-mail: mail6@pulsampp.ru

GAN HEMT BASED RF MICRO MODULES

*V.V. Gruzdov, Y.V. Kolkovsky, *V.M. Minnebaev*

JSC «S&PE «Pulsar»,
Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27, e-mail: mail6@pulsampp.ru

For many years JSC «S&PE «Pulsar» is working on the development of multifunctional microwave modules of various frequency ranges. A number of high-frequency micro modules, which are used in the transceiver X-band modules, are the result of this development.

ОАО «НПП «Пульсар» на протяжении многих лет занимается разработкой многофункциональных СВЧ модулей различных диапазонов частот [1-2]. Результатом этой работы стало появление ряда мощных (рис.1) и маломощных (рис.2) микро-модулей, входящих в состав приемно-передающих модулей X-диапазона частот [3–4].

Требования к габаритным размерам микро-модулей обусловлены тем, что они применяются в приемно-передающих модулях с достаточно плотной внутренней компоновкой и, при этом, должны иметь высокий уровень удельной выходной мощности.

Отличительной чертой маломощных усилителей мощности, в качестве первого каскада которых выступает дискретный GaN HEMT, является достаточно высокая устойчивость последнего к максимальной входной мощности. При прочих равных условиях, при использовании в качестве входного каскада приемного канала транзисторов или монолитных микросхем на основе арсенид-галлиевой технологии, необходимо также задумываться об устройствах защиты или огра-

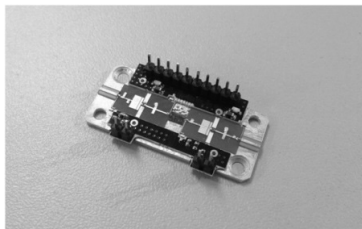


Рис. 1. Предварительный усилитель мощности для передающего канала

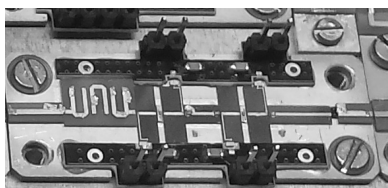


Рис. 2. Маломощный усилитель на основе GaN HEMT

нчителях мощности. Наличие потерь в схеме защиты ухудшает шумовые характеристики приемного тракта модуля ППМ.

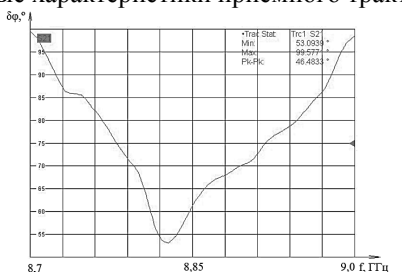


Рис. 3. а) искажение фазочастотной характеристики вследствие возбуждения выходного каскада

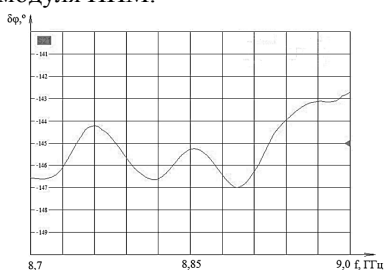


Рис. 3. б) семейство фазочастотных характеристик микро – модулей с правильно настроенными цепями подачи питания

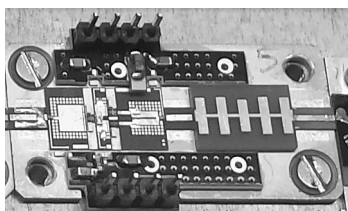


Рис. 4. Выходной усилитель мощности передающего канала ППМ на основе GaN HEMT

При анализе выходных каскадов микро-модулей ППМ (рис. 4) было установлено, что каскад микро-модуля выходного усилителя мощности становится потенциально неустойчивым (рис. 3а) на низких частотах (менее 100 МГц). Для обеспечения устойчивой работы микро-модуля (с $K_{уст} \gg 1$) необходимо снижение добротности цепи питания, что обеспечивает величину отклонения ФЧХ ($\delta\phi, ^\circ$) от линейной зависимости менее $\pm 5\%$ (рис. 3б).

Литература

1. I.M. Abolduyev, A.M. Zubkov, V.M. Minnebaev X-band Power Amplifier for Active Phased-Array Antennas // Proceedings of the 3rd International Conference on Satellite Communications, ICSC'98, part 1, Moscow, 1998, pp. 171-172.
2. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев / СВЧ электроника на основе нитрида галлия – основное направление создания радиоэлектронных систем. Электронная техника. Полупроводниковые приборы. Серия 2. Москва, стр. 88-101 (2015).
3. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский / Приемно-передающие нитрид-галлиевые СВЧ-модули для РЛС. Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. АО «ЦНИИ «Электроника», Москва, стр. 163-174, 2015.
4. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой / Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 328 с.

ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ ППМ НА GAN К ВХОДНОЙ СВЧ МОЩНОСТИ

*В.В. Груздов, А.О. Герасимов, *В.М. Миннебаев, А.В. Перевезенцев*

ОАО «НПП «Пульсар», Россия, 105187, г.Москва, Окружной проезд, д. 27,
e-mail: mail6@pulsarnpp.ru

GAN RECEIVING-TRANSMITTING MODULE STABILITY VS. MICROWAVE INPUT POWER

*V.V. Gruzdov, A.O. Gerasimov, *V.M. Minnibaev, A.V. Perevezencev*

JSC «S&PE «Pulsar», Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27,
e-mail: mail6@pulsarnpp.ru

Comparison of GaN and GaAs MIMCs microwave parameters and stability versus input power in RTM is presented. MMIC resistance to influence of input RF power is considered. Prospects of applications for both types of VVIS in a radar-location for various applications and service conditions are shown.

В работе представлен сравнительный анализ статических и СВЧ характеристик двух монолитных схем на основе нитрида и арсенида галлия. Рассматривается устойчивость схем к входной СВЧ мощности в условиях приема-передающего модуля. Показаны перспективы применения обоих типов МИС в радиолокации для различных применений и условий эксплуатации.

Одним из основных узлов приема-передающего модуля в системах связи и радиолокации, является малошумящий СВЧ усилитель. Основными элементом малошумящего усилителя, является арсенид-галлиевый полевой транзистор с высокой подвижностью электронов. В последнее десятилетие появились и получили широкое развитие, полевые транзисторы на основе нитрида галлия. Они нашли свое применение и обладают неоспоримыми преимуществами в усилителях СВЧ мощности и дополняют возможности разработчика при конструировании малошумящих усилителей приемных трактов для конкретных применений.

На рис. 1 представлены измеренные коэффициенты шума для двух монолитных интегральных схем на основе арсенида и нитрида галлия.

Обладая большим коэффициентом шума, GaN МИС уступает по этому параметру МИС на GaAs. При использовании монолитных схем в ППМ, когда уровни входных синхронных и несинхронных помех достигают сотен ватт, неотъемлемой частью СВЧ модулей является устройство защиты или ограничитель СВЧ мощности. В зависимости от количества каскадов и требуемых СВЧ параметров они имеют начальные потери от 0,3 до 1,5 дБ, что отражается на коэффициенте шума приема-передаю-

щего модуля. Из практики известно, что малошумящие GaN транзисторы позволяют подавать входные СВЧ мощности из расчета 6 Вт/мм и 12 Вт/мм, соответственно, для подложек из сапфира и карбида кремния, по сравнению с GaAs приборами ~ 1 Вт/мм.

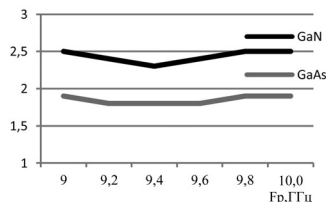


Рис. 1. Коэффициенты шума для монолитных интегральных схем нитрида и арсенида галлия

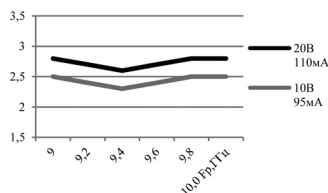


Рис. 2. Коэффициенты шума для GaN МИС при $V_c=20В$, $I_c=110мА$ и $V_c=10В$, $I_c=95мА$

GaAs, $V_c=10В$, $I_c=95мА$ и $V_c=3 В$, $I_c=80 мА$ соответственно. Это отражается на динамическом диапазоне усилителя по уровню 1 дБ, он больше на 5–7 дБ, но увеличивается рассеиваемая мощность, которая приводит к появлению дополнительных тепловых шумов на входе малошумящего усилителя. Для МИС GaAs рассеиваемая мощность составляет 0,24 Вт, а для GaN, с рекомендованным напряжением стока – 1 Вт. На рис. 2 показана зависимость коэффициента шума GaN МИС от режимов питания, где разница в температуре кристаллов смонтированных на коваровых держателях, без использования дополнительного теплоотвода, различается на 30 градусов.

Применение маломощных GaN малошумящих усилителей с коэффициентом шума аналогичным для арсенид-галлиевых схем, имеет только преимущества. Нитридный класс малошумящих усилителей позволяет работать в условиях ионизирующих излучений, больших температур и по помехозащищенности сохранять лучшую чувствительность.

Представленные МИС, имеют максимальную непрерывную входную СВЧ мощность 2,5 Вт и 0,1 Вт. МИС GaAs оснащенная простейшим ограничителем на р-і-n диоде с потерями $0,3\div 0,5$ дБ, будет иметь идентичный коэффициент шума и по максимальной входной СВЧ мощности, усилитель на GaAs с ограничителем, может конкурировать с усилителем на GaN. Основным принципом при подборе малошумящего

усилителя, при идентичной допустимой входной СВЧ мощности, здесь являются условия эксплуатации: радиационное воздействие, температура, потребляемая мощность. Критерием выбора того или иного исполнения усилителя, может выступить входная СВЧ мощность, когда потребуются выполнить защиту и МШУ на основе GaN. Следует отметить, отличие по напряжению и току потребления МИС на основе GaN от

**ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ТЕРМОЭЛЕКТРОТРЕНИРОВКИ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaIn/GaN**

**С.С. Арутюнян^{1,2}, К.А. Кагирина¹, Д.В. Лаврухин¹, С.А. Гамкрелидзе¹, Н.Е. Иванова¹*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук,

Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр.5, e-mail: spartakmain@gmail.com

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов
Российской академии наук, Россия, 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6

**EFFECT OF GAMMA RADIATION AND THERMAL CYCLING
ON HIGH-FREQUENCY PERFORMANCE OF AlGaIn/GaN INTEGRATED CIRCUIT**

**S.S. Arutyunyan^{1,2}, K.A. Kagirina¹, D.V. Lavruhin¹, S.A. Gamkrelidze¹, N.E. Ivanova¹*

¹Institute of microelectronics technology and high purity materials
of Russian academy of sciences, Russia, 142432 Chernogolovka, ul. Akademika Osipyana 6

²Institute of ultrahigh frequency semiconductor electronics of Russian academy of sciences
Russia, 117105 Moscow, Nagorny proezd 7 b 5, e-mail: spartakmain@gmail.com

AlGaIn/GaN 57÷64 GHz to 0,5÷2 GHz frequency converter chips stability was investigated. First group of samples were irradiated with 0,5 MeV gamma rays to doses up to 60 krad at 235, 313 and 368 K. Second group was thermally cycled for 1000 h at 85°C. The output frequency range, total drain current and conversion ratio measurements showed that despite of their changes frequency converter chips stayed operational.

Монолитные интегральные схемы (МИС) на основе AlGaIn/GaN являются перспективной электронной компонентной базой для эксплуатации в условиях воздействия внешних факторов, влияющих на работоспособность и надежность приборов [1]. В данной работе исследуется стойкость МИС преобразователей сигнала (ПС) на основе AlGaIn/GaN, изготовленных в ИСВЧПЭ РАН, к воздействию двух факторов – гамма-излучения и повышенной температуры с повышенным напряжением питания. ПС обладали следующими характеристиками: диапазон входного ВЧ-сигнала 57÷64 ГГц, диапазон выходного ВЧ-сигнала ($f_{пч}$) до 2 ГГц, преобразование сигнала без потерь (коэффициент преобразования $K_{пр} > 0$ дБ), ток потребления ($I_{потр}$) не более 100 мА.

Первая серия образцов была подвержена гамма-излучению при температурах 235, 313 и 368 К со средней энергией гамма-квантов 0,5 МэВ. Общая поглощенная доза составила 60 кРад. Вторая серия образцов про-

ходила процедуру термоэлектротренировки в течение 1000 часов при температуре 85°C и напряжениях питания от 5 до 10 В. Результаты измерения $f_{пч}$, $I_{потр}$ и $K_{пр}$ приведены в таблице 1 и на рис. 1.

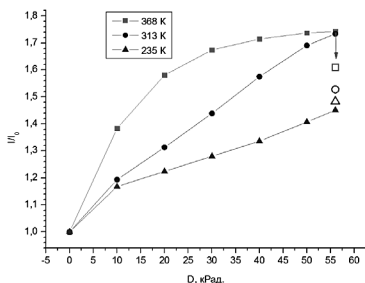


Рис.1 Зависимость нормированного на начальное значение тока потребления ИС от накопленной дозы

Облучение гамма-квантами привело к изменению токов потребления, что объясняется неравномерным образованием в подзатворной области транзисторов ПС одномерных дефектов кристаллической решетки как с донорными энергетическими уровнями (вакансии азота и межузельные атомы галлия), так и с акцепторными (межузельные атомы азота и вакансий галлия) [2, 3]. Термоэлектротренировка не привела к существенным отклонениям измеряемых параметров.

Таблица 1

Результаты воздействия гамма-облучения (образцы 1–3) и термоэлектротренировки (образцы 4-5) на МИС ПС

п/п	Т, К	$f_{пч}$, ГГц			$I_{потр}$, мА			$K_{пр}$, дБ		
		до	после	$\Delta f_{пч}$	до	после	$\Delta I_{потр}$	до	после	$\Delta K_{пр}$
1	235	0,983	0,983	-11%	91	100	+2%	6,85	10,94	+60%
2	313	1,043	0,923	-12%	99	62	-37%	7,65	14,39	+88%
3	368	0,968	1,073	0%	100	89	-11%	16,57	16,0	-3%
4	358	0,998	1,013	+2%	96	80	-0,2%	9,55	10,31	+8%
5	358	0,998	0,983	-2%	93	96	+3%	9,35	10,03	+2%

У всех образцов значения измеряемых параметров не вышли за пределы допустимых значений ($f_{пч} < 2$ ГГц, $I_{потр} < 100$ мА, $K_{пр} > 0$). Таким образом, изготовленные в ИСВЧПЭ РАН монокристаллические интегральные схемы ПС для частот 57÷64 ГГц на основе AlGaIn/GaN сохраняют работоспособность после гамма-облучения и после высокотемпературного воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0087, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0087).

Литература

1. В.Г. Мокеров (и др.), ФТП, **43** (4), 561 (2008).
2. Д.В. Громов (и др.), МЭС-2012, 598 (2012).
3. Moran J.T.(и др.), IEEE Transactions on, № **6** (56), 3226 (2009).

SI/3N НАНО ПРИБОРЫ: ВТОРОЕ ПРИШЕСТВИЕ КРЕМНИЯ

**В.И. Осинский¹, В.А. Лабунов², И.В. Масол¹, Г.Г. Горох², Н.Н. Ляхова¹,
Н.О. Суховий¹*

¹ГП «НИИ микроприборов» НТК «Институт Монокристаллов» НАН Украины,
Украина, Киев, ул. Пивнично-Сирецька, 3.
e-mail: osinsky@imd.org.ua

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники БГУИР,
Беларусь, 220013, Минск, П. Бровки, д. 6; e-mail: gorokh@bsuir.by

SI/3N NANODEVICES: THE SECOND COMING OF SILICON

**V.I. Osinskiy¹, V.A. Labunov², I.V. Masol¹, G.G. Gorokh², N.N. Laykhova¹,
N.O. Sukhoviyy¹*

¹State Enterprise Research Institute of Microdevices STS «Institute for Single Crystals»
of NAS of the Ukraine, Kiev, Pivnichna-Syretska str., 3,
e-mail: osinsky@imd.org.ua

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013, Minsk, Brovki Str. 6, e-mail: gorokh@bsuir.by

Development of new semiconductor $A^{III}B^V$ -materials for light sources, optoelectronic ultrahigh-frequency and high-temperature devices is an actual task during last decades. Integration of electronic elements with regular $A^{III}B^V$ -structures on Si leads to wide possibilities for invention of complex functional devices on a single cheap (Si/3N). Self-organized dielectric films, for example, porous anodic alumina are promising materials as a template for mounting of Si/3N nanodevices. The scientific approach of creation of new super bright white LEDs based on heterogeneous materials and nanoporous structures has been developed.

В последние годы исследовано большое количество технологий монокристаллической интеграции элементов на кремнии и соединениях A^3B^5 , в частности, на соединениях III-нитридов (3N). Однако, не достаточная эффективность, тепловые проблемы и относительно высокая стоимость создают существенные препятствия на пути их массового применения. Интеграция транзисторов на кремнии с гетеро структурами A^3B^5 позволяет создавать сложные функциональные монокристалльные устройства (Si/ A^3B^5). Несмотря на то, что первые одно чиповые устройства Si/ A^3B^5 были предложены нами еще в 1972 году и реализованы в 1975 [1], поиск новых технологий активно продолжается [2, 3, 4, 5]. Особый интерес для кремниевых пластин больших диаметров представляет технология Al_2O_3 нанотемплетов из анодированного оксида алюминия (АОА), способству-

ющих уменьшению количества дефектов при эпитаксиальном наращивании новых слоев.

Темплеты АОА имеют размеры пор от десятков до сотен нанометров и представляют большой интерес при формировании электронных, оптоэлектронных и микромеханических нано размерных устройств, а также для создания одноэлектронных транзисторов и квантовых компьютеров, способных работать при комнатной температуре. Оптимальные параметры нано пор темплета способствуют бездислокационному рельефу новых эпитаксиальных слоев даже при большом рассогласовании решеток (~5 %).

На базе нано темплетов АОА нами разрабатывается светодиодная Si/A³B⁵ технология на основе монокристаллической интеграции RGB светодиодных структур и кремниевых интегральных микросхем. При изготовлении эпитаксиальных структур Si/A³B⁵ реализован комплекс методов селективных, латеральных и темплетных нанотехнологий, обеспечивающих низкую плотность дефектов в структурах. Предложен принцип создания новых супер ярких белых светодиодов на базе гетерогенных материалов и нано пористых структур. Такие светодиоды содержат инжектирующие и активные слои, сформированные из метастабильных фаз многокомпонентного твердого раствора (в частности, AlGaInNPAsSb) на базе варизонных структур с квантовыми ямами и точками [6].

Литература

1. Осинский В.И., Интегральный оптрон, А.С. №551.730 (СССР), Приоритет (1973)
2. Масол И.В., Осинский В.И., Сергеев О.Т. Информационные нанотехнологии, К. –Макрос, - 2011, 500с.
3. Polyakov A. Y. et. al. Applied physics letters. **94**(2) 022114 (2009).
4. Osinsky V., Murchenko D. Quantum electronics and Optoelectronics. **12**(3) 240 (2009).
5. Osinsky V., Lyahova N., Syhoviyy N., Deminskiy P. Memoirs of the Faculty of Physics **2** 142304 (2014).
6. Osinsky V., Osinsky A., Miller R. Proc. of the LED 50-th Anniversary Symposium, University of Illinois, USA. (2012).

**ФРАКТАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ
К ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫМ СТРУКТУРАМ AlGaIn/GaN**

**Н.А. Торхов^{1,2}, И.Д. Филимонова¹, В.А. Новиков²*

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

**FRactal conductivity of the Ohmic contacts
to heteroepitaxial structures AlGaIn/GaN**

**N.A. Torkhov, I.D. Filimonova, V.A. Novikov*

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

It was shown that the conductivity of TiAlNiAu ohmic contacts to heteroepitaxial AlGaIn/GaN HEMT-based structures at the micronscale and nanoscale has nonlinear and chaotic nature, that could be described in terms of fractal geometry.

Известно, что морфология и зеренная субструктура большинства омических контактов (ОК), например [1], имеют фрактальную геометрию [2]. В связи с этим, в данной работе в рамках фрактальной геометрии проводились исследования интегральной проводимости TiAlNiAu ОК к гетероэпитаксиальным AlGaIn/GaN HEMT-структурам.

Исследования проводили контактным методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в Iрг-режиме тока растекания. Было получено, что интегральная проводимость ОК определяется совокупностью прилегающих друг к другу латеральных неоднородных проводящих участков, локальная проводимость которых может варьироваться в пределах нескольких наноампер (рис. 1). Статистический анализ этих участков показал сильную зависимость формы их контуров от линейных размеров измерительного масштаба (рис. 2). При этом в определенном интервале измерительных масштабов большие по размеру контуры заполнены статистически подобными контурами меньших размеров удовлетворяющих скейлинговым преобразованиям с коэффициентами N и η . Здесь $N=N(\eta)$ – количество контуров заполнения, а η – изменение линейных размеров масштаба. Это указывает на то, что геометрия форм самоафинных латеральных неоднородностей может быть описана фрактальной геометрией дробной размерности D_f с размерностью подобия $D_s(1)$ [2]:

$$D_s = \frac{\ln(N)}{\ln(\eta)} \text{ и } D_f = D_T + D_s, \quad (1)$$

где D_T – целая топологическая размерность. Было получено, что среднее значение размерности подобия латеральных неоднородностей тока при $N(\eta=100)=5016$ равна $D_s=1.85$. Из контурного изображения рис. 2 видно, что латеральные неоднородности обладают свойством топологического смешивания, т.е. большие и маленькие вложенные контуры не пересекаются между собой. Из этого следует, что проводимость ОК на микронном и наноуровне удовлетворяет всем необходимым признакам хаотических систем: 1 – зависимости от точки зрения наблюдателя (измерительного масштаба), 2 – наличия свойств топологического смешивания и 3 – сильной зависимости от внешних условий (небольшие изменения в технологии изготовления приводят к значительным изменениям проводимости). При этом, как было показано выше $D_s=1.85 > 1.5$, что является достаточным условием принадлежности данного объекта к хаотическим системам.

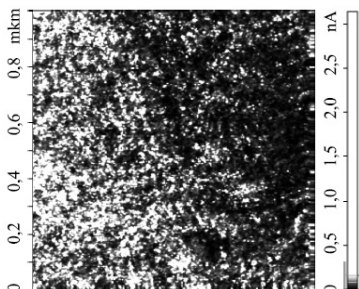


Рис. 1. АСМ-изображение тока растекания ОК TiAlNiAu к AlGaIn/GaN HEMT-структуре

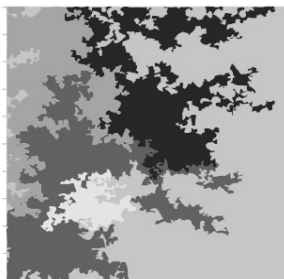


Рис. 2. Контурное изображение неоднородных областей латеральной проводимости ОК TiAlNiAu к AlGaIn/GaN HEMT-структуре

Т.о., впервые показано, что неоднородности латеральной проводимости омических контактов к AlGaIn/GaN HEMT-структурам на основе TiAlNiAu в локальном приближении на микронном и наноуровнях имеют нелинейную хаотическую природу и могут быть описаны на языке фрактальной геометрии дробных размерностей.

Литература

1. Imre Mojzes, Csaba Dominkovics, Gábor Harsányi, Szilvia Nagy, János Pipek, László Dobos. Heat treatment parameters effecting the fractal dimensions of AuGe metallization on GaAs. Appl. Phys. Lett., 91, 073107 (2007), doi: 10.1063/1.2768911.
2. Е. Федер. Фракталы. М.: Мир, 1991.

**РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ
ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫМ
AlGaIn/GaN HEMT-СТРУКТУРАМ**

**Н.А. Торхов*

¹Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов,
Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А, e-mail: trkf@mail.ru

**DIMENSIONAL EFFECTS OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS
IN OHMIC CONTACTS OF HETEROEPITAXIAL AlGaIn/GaN
HEMT-STRUCTURES**

**N.A. Torkhov*

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

Dimensional effects of R_{SH} , L_T , ρ parameters and R_c in ohmic contacts towards AlGaIn/GaN HEMT-structures appear depending on their W LTLM-tests lines thickness values and could be described using D_f fractional dimension fractal geometry language.

В данной работе линейным методом длины переноса (Linear Transmission Line Method – LTLM) (1) [1] с линейной геометрией контактных площадок шириной W , длиной $L = 20$ с увеличивающимся расстоянием l между ними (рис. 1) исследуются размерные эффекты в их электрических характеристиках: слоевым сопротивлением полупроводника под контактом $[R_{SK}] = \text{Ом}$, длиной переноса $[L_T] = \text{мкм}$ – расстоянием, на котором ток в области контакта уменьшается в e раз, относительными контактными сопротивлениями $[\rho] = \text{Ом} \times \text{см}^2$ и $[\rho^*] = \text{Ом} \times \text{мм}$ (табл. 1).

$$R_T = 2 \frac{L_T R_{SK}}{W} + \frac{l_i R_{SK}}{W}, \quad \rho = L_T^2 R_{SK}. \quad (1)$$

Пример измерения сопротивления $[R_T] = \text{Ом}$ между линейными элементами LTLM-тестов методом Кельвина представлен на рис. 2.

Из таб. 1 видно, что полученные значения R_{SK} , ρ и ρ^* закономерно увеличиваются с увеличением линейных размеров W – размерный эффект, что является одним из признаков хаотических систем с фрактальной геометрией дробной размерности. В этом случае, как сообщалось в [1], зависимость ρ от линейных размеров W тестов LTLM можно представить степенной зависимостью:

$$\rho_i = \rho_0 \left(\frac{W_0}{W_i} \right)^{D_T - D_f} = \rho_0 \left(\frac{W_0}{W_i} \right)^{-D_S}, \quad (2)$$

где D_T – топологическая размерность, D_S – размерность подобия, D_f – фрактальная размерность. Видно (2), что в глобальном приближении при $D_f = D_T$ значение $\rho_i = \rho_0$ перестает зависеть от линейных размеров W_i .

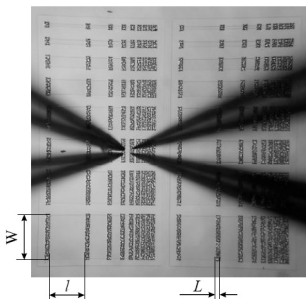


Рис. 1. LTLM-тесты измеряемые четырехзондовым методом Кельвина

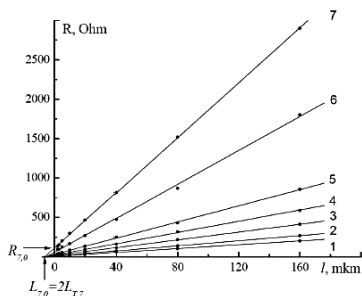


Рис. 2. Линейные зависимости $R_T(l)$ для LTLM-тестов с разными W_i , $i = 1 \dots 7$

Таблица 1

**Значения электрических параметров тестов ОК
определенных LTLM-методом**

№ i	W_{is} , μm	R_{SKis} , Ω	ρ_{is} , $\Omega \times \text{cm}^2$	ρ_{is}^* , $\Omega \times \text{mm}$
1	15	18.4	1.14E-06	0.04
2	25	40.5	3.49E-06	0.12
3	50	123.6	1.46E-05	0.43
4	70	250.6	2.25E-05	0.75
5	100	513.4	4.70E-05	1.55
6	150	1610.5	1.13E-04	4.26
7	200	3495.1	3.54E-04	11.12
$\langle D_S \rangle =$		1.70	2.04	1.99

Полученные результаты указывают на то, что в общем случае степенные зависимости дробных размерностей D_f и D_S (2) имеют важное практическое значение для определения в локальном приближении значений ρ и ρ^* в LTLM-методе на микронном и наноуровнях.

Литература

1. Н.А. Торхов, В.А. Новиков, И.В. Ивонин. Влияние размерных эффектов на контактное сопротивление омических контактов. 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 6–12 сентября 2015 г. Севастополь, Крым, Россия. 609–610.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЖИГАЕМОЙ КОМПОЗИЦИИ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ
НА ОСНОВЕ Si/Al к AlGaN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ**

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

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

**INVESTIGATION OF Si/Al-BASED ALLOYED OHMIC CONTACTS
TO AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURE**

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

Institute of ultra high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105, Moscow, Nagornij proezd 7, e-mail: dslapovskiy@gmail.com

The ohmic contact composition of Si/Al/Ni/Au was investigated for forming ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures using thermal annealing. Applying this composition helped to decrease the annealing temperature to 675–700°C, that led to smoother morphology of alloyed contacts compared with commonly used Ti/Al/Ni/Au. The value of resistance was estimated using Si/Al/Ni/Au composition to AlGaN/GaN heterostructure depending on the annealing temperature and annealing time, the lowest obtained value of resistance was 0.45 Ohm·mm.

Большая ширина запрещенной зоны и высокая слоевая концентрация электронов ($n_e > 10^{13} \text{ см}^{-2}$) делают гетеросистему AlGaN/GaN чрезвычайно перспективной для мощных сверхвысокочастотных (СВЧ)-приборов [1]. Активным элементом СВЧ интегральной схемы является полевой транзистор, и работы по исследованию контакта металл-полупроводник для гетеросистем AlGaN/GaN являются актуальными как в зарубежной, так и российской практике на сегодняшний день.

При формировании омических контактов к нитридным гетероструктурам уделяется внимание, как контактному сопротивлению, так и к их морфологии. Цель работы оценить морфологию и воспроизводимость контактов на основе Si/Al к гетеросистеме AlGaN/GaN. Использование традиционных омических контактов к нитридным гетероструктурам на основе Ti/Al основывается на быстром термическом отжиге (БТО) композиции металлов при температурах выше 800°C. Роль титана в композициях на основе Ti/Al – это образование нитрида титана, имеющего работу выхода 3.74 эВ [2], за счет чего формирование азотных вакансий, играющих роль под омическим контактом высоколегированного слоя. Легирующей примесью для нитрида галлия является кремний (Si), поэтому для

легирувания подконтактной области под омическим контактом было решено заменить Ti в традиционной композиции на Si. Данная замена материалов позволит снизить температуру отжига композиции, что должно благоприятно сказаться на морфологии омического контакта.

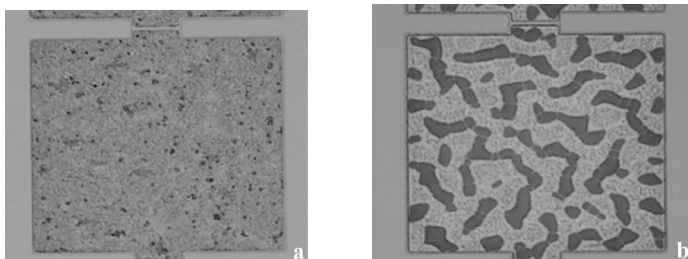


Рис. 1. Фотография морфологии омических контактов к гетеросистеме AlGaIn/GaN: a - Si/Al/Ni/Au; b - Ti/Al/Ni/Au

Проведено исследование зависимости морфологии и удельного контактного сопротивления композиции омического контакта на основе Si/Al от температуры и длительности отжига в среде азота при толщинах кремния 12.5 нм и 7.5 нм. Результаты сравнивались с традиционной композицией Ti/Al/Ni/Au, сформированной на той же гетеросистеме AlGaIn/GaN при температуре БТО 820°C в среде азота. Морфология полученных омических контактов с разной композицией представлена на рисунке 1.

При фиксированной температуре в интервале 660÷700°C при увеличении времени отжига сопротивление постепенно уменьшалось до уровня 0.45 Ом·мм. Меньшая толщина кремния позволяла достичь этих значений при меньшей длительности обработки. Увеличение температуры до 750°C позволяло получить минимальное удельное контактное сопротивление за меньший интервал времени, но при увеличении длительности обработки ухудшалась морфология и начинало расти удельное контактное сопротивление.

Композиция омических контактов на основе Si/Al позволяет получать воспроизводимые контакты к гетеросистеме AlGaIn/GaN с удельным контактным сопротивлением сопоставимым с традиционной композицией с более гладкой морфологией.

Литература

1. В.Г. Мокеров и др. AlGaIn/GaN-СВЧ НЕМТ-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц. ФТП, 2009, том 43, вып. 4, стр. 561–567.
2. R. C. Glass, L. M. Spellman, and R. F. Davis, Appl. Phys. Lett. 59, 2868 (1991).

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗМАСОЧНОЙ НАНОЛИТОГРАФИИ ЗАТВОРА
СВЧ ТРАНЗИСТОРА С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ**

**К.К. Лаврентьев*

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1,
e-mail: lavrkk@list.ru

**PARAMETERS OPTIMIZATION OF MASKLESS NANOLITHOGRAPHY
FOR HEMT TRANSISTOR GATE**

**K.K. Lavrentyev*

National Research University of Electronic Technology,
Russia, 124498, Moscow, Shokin square 1, e-mail: lavrkk@list.ru

Techniques have been developed for forming nanoscale elements of gate of HEMT transistor based on AlN/GaN heterostructures. Optimal exposure doses of AR-P 6200 electron beam resist when using in focused ion beam (FIB) lithography is 12-25 fC/nm². Process resolution is 9,1 lines/um. Resist contrast (21) was determined from the slope of dose curve. Drain current density in HEMT transistors fabricated by this technique is above 940 mA/mm. The transconductance was increased up to more than 220 mS/mm.

Для увеличения крутизны и рабочей частоты транзисторов с высокой подвижностью электронов необходимо уменьшать топологические размеры их элементов, в первую очередь, затворов. Ионная литография (ИЛ), одна из самых перспективных технологий создания структур нанoeлектроники, отличается высокой скоростью экспонирования и разрешением ввиду больших удельных потерь энергии ионом и отсутствия дифракционных ограничений [1]. Кроме того, ИЛ не требует изготовления дорогостоящих шаблонов. Поскольку коммерчески доступных специфических материалов для ИЛ в настоящее время не существует, в данной технологии применяются электронные резисты. Так как разрешение процесса и возможности его применения напрямую зависят от характеристик резиста, необходимо изучить свойства новейших электронных резистов при их экспонировании фокусированным ионным пучком (ФИП). Одним из созданных в последние годы электронных резистов с низкой скоростью плазменного травления является AR-P 6200 производства компании AllResist (Германия).

В слое резиста, нанесенного на тестовую кремниевую пластину, были проэкспонированы тестовые структуры в виде массивов квадратов со стороной 3 мкм и линий шириной менее 100 нм с возрастающей дозой

(ток пучка ионов галлия 1 пА либо 30 пА, энергия пучка 30кэВ, расстояние между точками воздействия ионного пучка 25–100 нм). Квадраты необходимы для построения дозовой кривой и, соответственно, нахождения чувствительности резиста, а линии – для определения минимального контролируемого топологического размера и разрешения процесса. После проявления в проявителе AR 600-546 ширина линий и глубина квадратов были измерены методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). По итогам определения перепадов высот на АСМ-изображениях проявленных квадратов построена дозовая кривая для резиста AR-P 6200, на основе анализа её квазилинейного участка определена контрастность резиста, равная 21. Максимальная глубина проявления резиста, ограничена малой длиной пробега ионов в материале, составляет 56 нм. При малом времени экспонирования глубина проявления возрастает с увеличением дозы, однако при дальнейшем увеличении времени воздействия ФИП начинает убывать вследствие преобладания эффекта полимеризации резиста над разрывом внутримолекулярных связей. Для большинства электронных резистов дозовая кривая имеет аналогичный вид при экспонировании как электронным [2], так и ионным пучком [3]. Оптимальная доза экспонирования резиста AR-P 6200 составляет 12–25 фКл/мкм². Минимальная ширина созданных обратной литографией металлических линий равна 60 нм, минимальный контролируемый размер промежутка между линиями – 50 нм. Разрешение процесса равно 9,1 линий/мкм.

Испытания созданных с применением данной литографической технологии образцов приборов транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур типа AlN/GaN показали удельную крутизну более 220 мСм/мм и плотность тока насыщения, равную 938 мА/мм. Характеристики созданных приборов соответствуют уровню мировой электроники на основе структур AlN/GaN. Полученные результаты литографии демонстрируют возможность создания различных элементов транзисторов и интегральных схем с размером от 50 нм с применением безмасочной ионной литографии.

Литература

1. Heinz D. Wanzenboeck, Simon Waid. Focused Ion Beam Lithography // Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications. InTech, 2011. – p. 27-50.
2. Hoole A.C.F., Welland M.E., Broers A.N. Negative PMMA as a high-resolution resist-the limits and possibilities // Semicond. Sci. and Technol. – 1997. Vol. 12, No. 9. pp. 1166-1170.
3. Зайцев А.А., Лаврентьев К.К., Левин Д.Д., Царик К.А. Влияние воздействия фокусированного ионного пучка на свойства полиметилметакрилата при создании наноструктур // Труды 56-й научной конференции МФТИ. Физическая и квантовая электроника. – М.: МФТИ, 2013. – с. 49-50.

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ТРАВЛЕНИЯ НИТРИДА ГАЛЛИЯ
В ХЛОРОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ**

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

¹ОАО «ОКБ-Планета»,
Россия, 173004, г. Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, 2/13,
e-mail: ZhelannovAV@okbplaneta.ru

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

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY ETCHING OF GALLIUM NITRIDE
IN CHLORINE-CONTAINING ENVIRONMENT**

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

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

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

The paper presents the research on the selection of etching mode gallium nitride layers in a chlorine-containing environment. GaN layers grown on a sapphire substrate by MOCVD. Showing depending on the speed of etching capacity at a fixed pressure and gas flow rate. Obtained etching rate at 0.8 um min at a ICP power 600 W and RF power 120 W at a pressure 1,2 Pa and the ratio of gas BCl₃/Cl₂/Ar 20:60:10 sccm.

Структуры на основе полупроводниковых нитридов – GaN, AlN и соединений AlGa_n, InGa_n рассматриваются как перспективные материалы для электронной и оптоэлектронной техники. Их преимущество – широкий спектр применений. На их основе можно изготавливать структуры с барьерами Шоттки для приборов силовой электроники, различные транзисторы, в том числе для СВЧ электроники [1, 2].

Эпитаксиальные слои нитрида галлия выращиваются, как правило, на непроводящих подложках сапфира или на полуизолирующих подложках карбида кремния. Подложки из SiC имеют преимущество перед сапфиром из-за меньшего рассогласования постоянных решетки. Использование такого рода подложек приводит к необходимости введения в технологический процесс операции микропрофилирования для формирования областей для металлизации контактов к областям материала n-типа проводимости, а также формирования изоляции между элементами.

В работе представлены результаты исследований по глубокому (более трех микрон) травлению эпитаксиальных слоев нитрида галлия. В

экспериментах операции удаления слоев проводились на установке травления в индуктивно-связанной плазме.

Проведена серия экспериментов по формированию рельефа, при этом травление слоев нитрида галлия n-типа осуществлялось в индуктивно-связанной плазме в атмосфере $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$.

В качестве исходных образцов использовались эпитаксиальные слои GaN, выращенные методом MOCVD (химическое осаждение из газовой фазы с использованием металлорганических соединений) на сапфировой подложке диаметром 2 дюйма. В работе использовались нелегированные слои нитрида галлия толщиной 1.7 мкм.

При изготовлении меза-структур маска формировалась методом прямой фотолитографии по слою никеля толщиной 0,2 мкм с подслоем двуокиси кремния толщиной 0,3 мкм.

Травление образцов осуществлялось на установке Sentech SI500 при соотношении газовых потоков $\text{BCl}_3:\text{Cl}_2:\text{Ar}$ равном 20:60:10 sccm, давлении в реакторе 1.2 Па при изменении высокочастотной (ВЧ) мощности и мощности индуктивно-связанной плазмы без нагрева образцов.

Толщины слоев и профили травления контролировались с помощью профилометра (Talysurf CCI-Lite), сканирующего электронного (Hirox) и атомно-силового (NT-MDT) микроскопов.

В результате проведенных исследований установлена максимальная скорость травления GaN – 821 нм/мин при ИСП и ВЧ мощностях 600 и 120 Вт, соответственно. При этом маска травится со скоростью порядка 20 нм/мин.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований установлены режимы травления нитрида галлия, позволяющие травить эпитаксиальные слои полупроводника на глубину более трех микрон с гладкой поверхностью и наклоном боковых стенок порядка 80° . Получены маски, защищающие поверхность GaN от длительного плазмохимического травления в атмосфере $\text{BCl}_3:\text{Cl}_2:\text{Ar}$.

Литература

1. Балакирев А., Туркин А. Перспективы нитрида галлия В СВЧ-электронике. Решения компании RFHIC // Электроника: НТБ . – № 4. – 2015. – С. 64-68.
2. Желаннов А.В., Федоров Д.Г., Селезнев Б.И. Диоды Шоттки на нитриде галлия // Мокеровские чтения: 5-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. – М.: 21-22 мая 2014 г. – С. 29-30.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ТРАВЛЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ
В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ**

**А.Д. Бакун, О.В. Васильева, Н.В. Сиглова, С.С. Лебедев*

¹Институт функциональной ядерной электроники НИЯУ МИФИ,
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31, e-mail: exp.phys.lab@gmail.com

**STUDY IN DEEP ETCHING OF SILICON CARBIDE WITH HIGH SPEED
IN PLASMA-CHEMICAL PROCESSES**

**A.D. Bakun, O.V. Vasileva, N.V. Siglova, S.S. Lebedev*

¹Institute of functional nuclear electronics MPhI 115409, Moscow, Kashirskoye h., 31,
e-mail: exp.phys.lab@gmail.com

Microwave devices on AlGaIn/GaN heterostructures on substrates of silicon carbide (SiC) is one of the most promising areas of nanoelectronics. The final stage of creating transistors is the etching through holes with subsequent metallization of the back side of the plate [1]. This work is devoted to the study of silicon carbide etching modes and find a better parameters for process.

СВЧ приборы на гетероструктурах AlGaIn/GaN на подложках карбида кремния (SiC) являются одним из самых перспективных направлений современной нанoeлектроники. На конечном этапе создания транзисторов проводится травление сквозных отверстий с последующей металлизацией обратной стороны пластины [1]. Данная работа посвящена исследованию режимов травления карбида кремния.

Скорость плазмохимического травления зависит от параметров, которые влияют на концентрацию химически активных частиц плазмы и активных центров на обрабатываемой поверхности. К таким параметрам, прежде всего, относится вкладываемая в электрический разряд ВЧ мощность. Это связано с тем, что она определяет электронную температуру плазмы, от которой зависит компонентный состав и концентрация реактивных частиц плазмы. Зависимость скорости травления от мощности в реакторах с индуктивно-связанной плазмой, как правило, линейно возрастающая. Исследование операционных параметров процесса, таких как ВЧ мощность, расход и соотношение рабочих газов, проводилось на основе режима, показанного в работе [2]. Результаты экспериментов для мощностей, подаваемых на нижний электрод и катушку приведены на рис. 1 (А и Б).

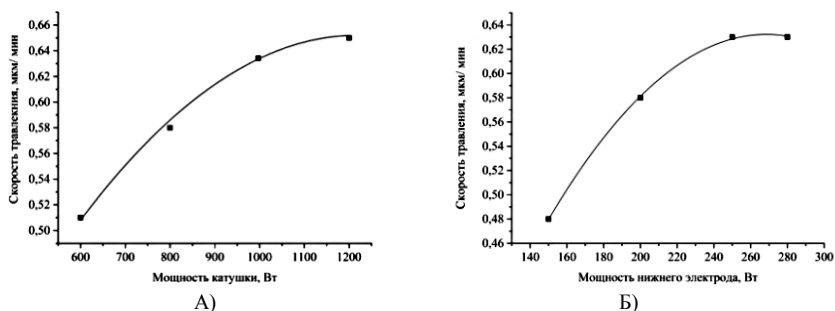


Рис. 1. Зависимость скорости травления от А) мощности катушки; Б) нижнего электрода

Характер влияния давления в рабочей камере на скорость травления является более сложным, чем зависимость от ВЧ мощности [3]. У данной зависимости наблюдается максимум, или плато, при давлениях 3–5 мТорр, что и является допустимым режимом по данному параметру. Зависимости скорости травления от расхода рабочих газов также показали нелинейный характер зависимости и имеют явный максимум.

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что добавление в газовую смесь инертного газа, может существенно ускорить процесс травления за счёт усиления бомбардировки поверхности тяжелыми ионами Ag^+ , образующимися в ICP плазме [4]. Однако, при достижении потоком Ag величины большей величины потока основного травящего газа (SF_6) скорость процесса травления существенно снижается.

Исходя из полученных в работе зависимостей, в работе были определены оптимальные параметры, или их диапазон для проведения высокоскоростного травления карбида кремния.

Литература

1. The VLSI Handbook / Edited by Wai-Kai Chen, – CRC Press LLC, 2000 Corporate Blvd., N. W., Boca Raton, Florida.
2. Бакун А.Д., Особенности технологии травления сквозных отверстий в подложках карбида кремния / Бакун А.Д., Васильева О.В., Лебедев С.С., Шостаченко С.А., Миннебаев С.В., Сиглова Н.В. // XIV Научно-техническая конференция "Пульсар - 2015", 7-9 октября 2015 г., Москва.
3. Anthony Barker Advances in Back-side Via Etching of SiC for GaN Device Applications / Anthony Barker, Kevin Riddell, Huma Ashraf and Dave Thomas // CS MANTECH Conference, May 13th - 16th, 2013, New Orleans, Louisiana, USA.
4. H. Cho Ultradeep, low-damage dry etching of SiC / H. Cho, P. Leerungnawarat, D. C. Hays, S. J. Pearton, S. N. G. Chu // APPLIED PHYSICS LETTERS VOLUME 76, NUMBER 6, 7 FEBRUARY 2000.

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА
ЖИДКОСТНОГО ТРАВЛЕНИЯ**

**Д.С. Веселов, Ю.А. Воронов, А.В. Гайбура*

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

AUTOMATED UNIT OF WET ETCHING

**D.S. Veselov, Yu.A. Voronov, A.V. Gaibura*

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

This paper is devoted to the development of wet etching unit and its control system. The experimental model represents the reaction chamber, equipped with the stirrer and steam-gas condenser, located inside the heated chamber. The unit is also equipped with heat-insulated reservoirs for preheating of etchants and water. The control system provides automated supplying of liquids into reaction chamber. This allows realizing multistage etching in single technological cycle with etchants replacement and substrate washing, without its extraction from reaction chamber. With using the unit was studied deep anisotropic etching of silicon in various alkaline etchants. Was revealed, that unit provides the uniformity of etched surface on the level of about 1 μm .

В настоящее время в технологии интегральных микросхем наряду с плазмохимическими способами травления все чаще применяется жидкостное травление кремния. Оно отличается простотой, низкой стоимостью реализации и обеспечивает высокую равномерность поверхности травления. Но при жидкостном травлении затруднительна стабилизация температуры и концентрации травителя. Кроме того, оно требует обеспечения равномерного доступа травителя к поверхности травления.

Для стабилизации режимов жидкостного травления необходимо разработать специальную установку. Для исключения влияния человеческого фактора на выход годных изделий требуется разработать систему автоматизированного управления установкой.

Разработана конструкция и система управления установки жидкостного травления, представленная на рисунке 1. Оно состоит из теплоизоляционного корпуса 6, внешнего разогреваемого контура 8 с теплоносителем, внутренней камеры травления 10 для загрузки кассеты 14, системы конденсации парогазовой взвеси 25, накопительной емкости 38 с водой. Во внешнем контуре расположен нагревательный элемент 17, работа которого контролируется по термопарам 9 и 13. Внешний контур осна-

щен каналом 20 с встроенным клапаном 18 и каналом 5 для слива и залива теплоносителя. Доступ в камеру травления осуществляется через теплоизолированную дверь 4 и герметичную дверь 2, на которой расположен привод 3 лопастей 1 для перемешивания травителя. Камера травления оснащена каналом 19 для слива травителя со встроенным клапаном 16. Установка оснащена ёмкостью 33 с отверстием 21 для залива травителя, нагреваемого при помощи спирального нагревателя 32, контролируемого по термодаре 31. Травитель подается в камеру по каналу 34, а по каналу 39 из ёмкости 38 подается вода, температура которой поддерживается нагревателем 40, по термодаре 36. По окончании травления вода подается насосом 41 через клапан 15 и контролируется датчиком уровня жидкости 12. С обратной стороны камеры находится водяной клапан 35, через который насосом 30 по каналу 37 из камеры вымывается травитель, процесс контролируется уровнемером жидкости 11. Из камеры травления по каналу 22 в систему конденсации отводится парогазовая взвесь, где пар конденсируется и по каналу 27 компоненты травителя возвращаются в камеру, а газ по каналу 24 с обратным клапаном 26, отводится из установки. По каналу 28 в систему конденсации подается охладитель и выводится по каналу 23. При расположении кассеты 14 в камере травления канал 42 для отвода избыточного давления из кассеты подсоединяется к каналу 29. Для удобства работы управляющее оборудование выведено на приборную панель 7.

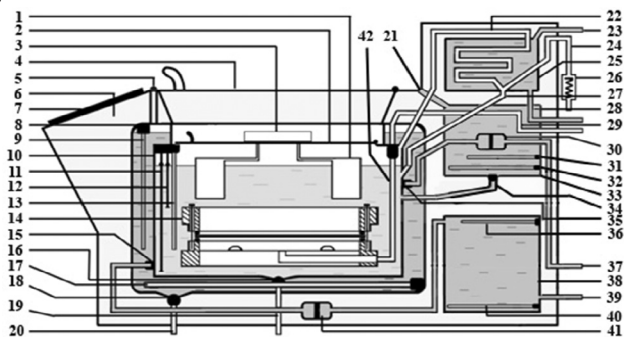


Рис. 1. Автоматизированная установка жидкостного травления

Разработана автоматизированная установка для проведения многостадийных технологических циклов жидкостного травления с заменой растворов и промывкой подложки без её извлечения из камеры травления. Выявлено, что при травлении на глубину сотен микрометров установка обеспечивает равномерность травления кремния на уровне 1 мкм. Себестоимость установки составляет всего лишь 150 000 рублей.

**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА
С КАНАЛОМ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА**

*С.А. Шостаченко¹, *А.В. Устюгова¹, Р.В. Захарченко¹, Г.И. Зебрев¹, Н.И. Каргин¹*

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

**THE TECHNOLOGY OF DEVELOPING AND CHARACTERISTICS
OF GRAPHENE BASED FIELD EFFECT TRANSISTOR**

*S.A. Shostachenko¹, *A.V. Ustyugova¹, R.V. Zakharchenko¹, G.I. Zebrev¹, N.I. Kargin¹*

¹National Research Nuclear University «MEPhI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: sashostachenko@gmail.com

In this article we have studied the influence of Si₃N₄ and SiO₂ thin film gate dielectrics on the current-voltage characteristics of graphene based transistor. Test structure of graphene transistor was fabricated with the top and back gate. Graphene has been produced by chemical vapor deposition, and then transferred to the silicon dioxide on silicon wafer. The channel of the transistor has been formed by etching in oxygen plasma through a photolithographic mask. Metals electrodes of drain, source and gate were deposited by resistive evaporation in vacuum. It was used titanium / aluminum with a thickness of 50/200 nm. In the case of the back gate silicon dioxide was used, obtained by thermal oxidation of the silicon substrate. For top gate was used silicon nitride deposited by plasma chemical deposition. It was demonstrated that field effect is more pronounced for the case of SiO₂ back gate compare to the Si₃N₄ top gate. For the SiO₂ back gate we have observed that the source-drain current decreases, from 2 mA to 3 mA, with increasing of the gate voltage, from 0 to 40 V, at constant source-drain voltage, 2 V. In case of Si₃N₄ top gate the modulation of source drain current was not significant for the comparable electric field strength. Based on the value of gate voltage for current minima in transfer function the poor quality of Si₃N₄ – graphene interface is concluded.

В связи с уникальными свойствами, графен привёл к всплеску идей и предположений для будущих RF приложений, вплоть до THz диапазона. В первую очередь речь идёт об аналоговой электронике в терагерцовых диапазоне с применением графеновых транзисторных модуляторов сигнала, поскольку цифровой ключ на графене, имеющем нулевую запрещённую зону, трудно создать, хотя исследования по созданию «искус-

ственной» запрещённой зоны в графене интенсивно ведутся. СВЧ приложения графена распространяются на фотодетектирование, модуляцию и лазерную генерацию света [1–3].

В работе проведено исследование влияния материала и расположения подзатворного диэлектрика на основе пленок Si_3N_4 и SiO_2 на выходные вольт-амперные характеристики полевого транзистора, каналом которого являлась графеносодержащая пленка. Была изготовлена тестовая структура графенового транзистора с верхним и нижним затвором. Графен был получен методом химического осаждения из газовой фазы, и затем перенесен на оксид кремния на кремнии. Канал транзистора был сформирован методом травления в кислородной плазме через фотолитографическую маску. Металлы электродов стока, истока и затвора были нанесены методом резистивного испарения в вакууме. Была выбрана конструкция титан/алюминий с толщинами 50/200 нм. В случае нижнего затвора был использован диоксид кремния, полученный термическим окислением кремниевой подложки. Для верхнего затвора был использован нитрид кремния, нанесенный методом плазмохимического осаждения. Показано, что эффект поля в транзисторной структуре с нижним подзатворным диэлектриком на основе пленки SiO_2 проявляется отчетливее по сравнению со структурой на основе пленки Si_3N_4 к верхнему затвору. При изменении управляющего напряжения затвор-исток от 0 до 40 В ток стока в транзисторной структуре с нижним подзатворным диэлектриком на основе пленки SiO_2 уменьшается от 2 до 3 мА при напряжении сток-исток $U_{\text{си}} = 2$ В. При сравнимых напряженностях электрического поля в случае транзистора с подзатворным диэлектриком из Si_3N_4 полевой эффект практически не наблюдался. На основании анализа напряжения для минимума передаточной функции делается вывод о недостаточном качестве интерфейса графен-нитрид кремния для эффективного управления каналом.

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования НИЯУ МИФИ «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России, уникальный идентификатор научных исследований (проекта) RFMEFI58414X0001.

Литература

1. Novoselov K. // Nature. 2005. V. 438. P. 197.
2. Chen Z. // Physica E. 2007. V. 40. P. 228.
3. Novoselov K. // Science. 2004. V. 306. P. 666.

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ И ВНЕШНЕГО ЛЕГИРОВАНИЯ
НА ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФЕНОВЫХ
ПОЛЕВЫХ СТРУКТУР**

**Г.И. Зебрев*

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

**IMPACT OF EXTRINSIC INTERFACE TRAPS AND DOPING ATOMS
ON CONDUCTIVITY OF GRAPHENE FIELD EFFECT DEVICES**

**G.I. Zebrev*

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

Interface traps are a fundamental non-ideality of a semiconductor surface (interface). The role of fast interface traps in operation of graphene gated field-effect devices which can vary in a wide range of values depending on purity and quality of the interface or the substrate needs to be understood. This leads to importance of experimental determination of the interface trap energy spectra based particularly on capacitance measurements. The objective of this report is to develop extraction methods of the interface trap parameters as adapted to graphene devices based on experimental capacitance data. Near-interfacial traps (defects) are located exactly at the interface or in the oxide typically within 1-3 nm from the interface. These defects can have generally different charge states and capable to be recharged by exchanging carriers (electrons and holes) with the device channels. Due to the exchange possibility the near-interfacial traps keep track the Fermi level position in graphene.

Поверхностные состояния являются неустраняемым фактором, определяющим функциональные характеристики всех полевых структур, в том числе, полевых транзисторов с графеновым каналом. Роль поверхностных состояний и их количественные характеристики (в частности, типичные времена перезарядки) могут варьироваться в широком диапазоне значений, в зависимости от чистоты и качества графена или диэлектрической подложки.

Граничные ловушки (дефекты) могут располагаться непосредственно на границе раздела графен – диэлектрическая подложка, либо в диэлектрике, как правило, в пределах 1÷3 нм от границы раздела. Эти ловушки могут иметь разные зарядовые состояния и способны обратимым образом

обмениваться носителями зарядов (электронами или дырками) с графеновым слоем, в зависимости от положения уровня Ферми в графеновой пленке, задаваемого напряжением зарядом на затворе (см. рис. 1). Подложка может также намеренно легироваться контролируемым количеством атомов акцепторного или донорного типа. Химическое допирование такого рода может быть использовано для создания проводящих графеновых пленок с заданной проводимостью.

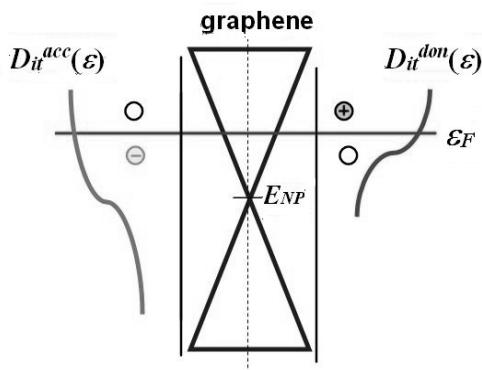


Рис. 1. Равновесные зарядовые состояния доноров (нейтральны, когда заполнены) и акцепторов (отрицательны, когда заполнены) задаются положением уровня Ферми в графене

Кроме того, загрязнение открытой поверхности графена неконтролируемыми акцепторными и/или донорными примесями может приводить к искажению передаточных вольтамперных характеристик графеновых транзисторов, нарушение симметрии электронно-дырочных ветвей, существенному уменьшению подвижности эффекта поля [1]. Неравновесные эффекты, связанные с задержками заполнения и опустошения ловушек, приводят к появлению гистерезиса ВАХ.

Все это приводит к необходимости изучения подобных эффектов и важности экспериментального определения энергетической плотности поверхностных состояний на основе емкостных методов и методов проводимости и их влияния на вольтамперные характеристики графеновых транзисторов.

Литература

1. G.I. Zebrev et al., IEEE Trans. Elect. Dev., **TED-60**, 1799 (2013).

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСПОРТА
В ТЕРАГЕРЦОВЫХ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ
ДВУХБАРЬЕРНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ GaAs/AlAs**

*А.А. Алексанян, И.П. Казаков, *А.Л. Карузский, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин,
А.В. Пересторонин, А.М. Цховребов, С.С. Шмелев*

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский пр. 53, 119991, Москва, тел. +7(499)1326493, e-mail: karuz@sci.lebedev.ru

**INTERPLAY OF HIGH-FREQUENCY REPLICAS AND TRANSPORT PROPERTIES
IN THE TERAHERTZ RESONANT-TUNNELING DOUBLE BARRIER
NANOSTRUCTURES ON THE BASE OF GaAs/AlAs**

*A.A. Aleksanyan, I.P. Kazakov, *A.L. Karuzskii, Yu.A. Mityagin, V.N. Murzin,
A.V. Perestoronin, A.M. Tshovrebov, S.S. Shmelev*

P. N. Lebedev Physical Institute of RAS, Leninsky pr. 53, 119991 Moscow, Russia,
tel. +7(499)1326493, e-mail: karuz@sci.lebedev.ru

Periodical features of the NDC region in the current-voltage characteristics of a high-quality terahertz resonant-tunneling diode are considered taking account of the LO-phonon-emission assisted tunneling of electrons through the quantum region (barriers and well) of the resonance system. Changes in the I - V curves of the resonant-tunneling diode under the variation of the measuring circuit (shunt R_p or serial load R_s) have been experimentally studied and analyzed. The revealed substantial changes in the current-voltage characteristics of the resonant-tunneling diode are discussed schematically.

Квантовые эффекты, генерация гармоник и механизмы детектирования субтерагерцового и терагерцового излучения в полупроводниковых одноямных и двухямных резонансно-туннельных наноструктурах представляют большой интерес с точки зрения перехода твердотельной электроники в область суб-ТГц и ТГц частот. Чрезвычайно важным является построение адекватной квантовой теории [1,2], позволяющей количественно анализировать эффекты высокочастотного электромагнитного поля в РТД наногетероструктурах. Для выращивания методами МПЭ РТД структуры с уточненными оптимальными структурными и электрофизическими параметрами необходимо сравнивать теорию с экспериментальными вольтамперными характеристиками (ВАХ), не искажёнными при измерениях внешними факторами. Источниками искажений ВАХ в виде гистерезиса, бистабильности, появления плоских участков, ступенек и перескоков, являются большое сопротивление последовательной нагрузки (R_s), возбуждение паразитной генерации и накопление заряда в квантовой яме [3]. В качественных образцах РТД проявляется фоновая

реплика основного пика туннельного тока за счёт резонансного туннелирования с испусканием высокочастотного (36 мэВ) ЛО фонона [3-5], которую необходимо учитывать в сравнениях с теорией терагерцовой генерации при резонансном туннелировании с испусканием фотона [1,2]. Влияние перечисленных факторов устраняют измерения второй производной ВАХ в обычной последовательной (R_s) схеме и измерения ВАХ РТД в схеме с параллельной нагрузкой (R_p) [5].

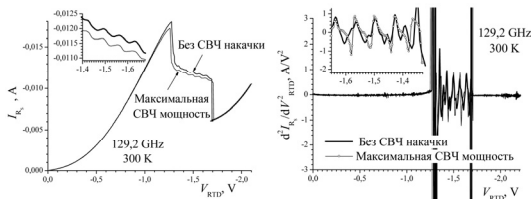


Рис. 1. ВАХ и её вторая производная для ДБРТД при отсутствии и при воздействии излучения СВЧ мощности. $T=300$ К, «квантовая» область AlAs/GaAs 23/45/20 Å

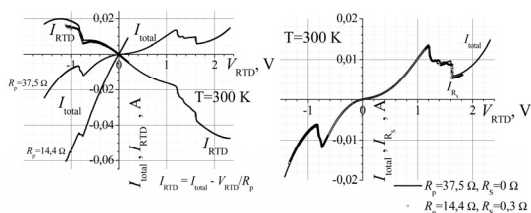


Рис. 2. ВАХ для ДБРТД в схеме с параллельной нагрузкой для двух значений R_p . Справа сравнение такой ВАХ с ВАХ, измеренной на последовательном R_s в плече РТД

ВАХ РТД по сравнению с результатами измерений в обычной схеме с последовательной нагрузкой (рис. 2), которые обсуждаются с учётом законов Кирхгофа. РФФИ (14-02-00658, 15-02-09055).

Литература

1. В.Ф. Елесин, ЖЭТФ, т.116(2), с.704 (1999), т.121(4), с.925 (2002), т.127(1), с.131 (2005).
2. В.В. Капаев, ЖЭТФ, т.148(2), с.349 (2015).
3. C.J. Goodings et al., J. Appl. Phys., v.75 (4), p.2291 (1994).
4. V.J. Goldman et al., Phys. Rev. B, v.36 (14), p.7635 (1987).
5. M. Bao, K.L. Wang, IEEE Transactions on Electron Devices, v.53 (10), p.2564 (2006).
6. А.А. Алексаян и др., Вестник НИЯУ «МИФИ», т.3 (6), с.671 (2014).
7. H. Sugiyama et al., NTT Technical Review, v.9 (10), p.1 (2011).

В работе исследованы обнаруженные экспериментально [6] периодические особенности участка ОДП ВАХ (рис. 1), наблюдавшиеся в двухбарьерных РТД высокого качества, соответствующего использованию в диапазоне ТГц частот [7]. Для объяснения предложен механизм фононных реплик за счёт резонансного туннелирования с возбуждением высокочастотных ЛО фононов. Предпринятые при этом измерения ВАХ РТД в схеме с параллельной нагрузкой (R_p) выявили существенные отличия

ИЗОПЕРИОДНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ GaInPSbAs/InAs

* *М.Л. Лунина*¹

¹Южный научный центр Российской академии наук,
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: lunin_ls@mail.ru

IZOPERIODIC HETEROSTRUCTURES GaInPSbAs/InAs

* *M.L. Lunina*¹

¹Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences
Russia, 344006 Rostov-on-Don, pr. Chekhova 41, e-mail: lunin_ls@mail.ru

Within the regular solution model analysis heterophase equilibria in the system Ga-In-P-Sb-As. The calculations showed that at lower temperatures the width of the existence of solid solutions GaInPSbAs decreases in accordance with values of functions molar excess mixing of the components in the solid phase. It is shown that the lattice mismatch at the layer parameters and value $\delta a = 0,1\%$ results in stresses at the interface which prevents the spinodal decomposition and consequently, increase the region of existence of solid solutions.

Многокомпонентные твердые растворы на основе соединений АЗВ5 представляют интерес в качестве материалов для фотоприемных устройств в видимом и ИК-диапазонах спектра. К таким материалам, в частности, относятся твердые растворы GaInPSbAs. Однако получение этих твердых растворов сопряжено с рядом трудностей: наличие обширной области несмешиваемости, узкий коридор значений переохлаждения, необходимого для эпитаксиального роста из жидкой фазы, вероятность формирования нестехиометрических составов и т.д.

Целью данной работы является анализ фазовых равновесий гетеросистемы GaInPSbAs/InAs.

Расчет периодов кристаллических решеток $a(x, y, z)$, ширины запрещенной зоны (E_g) и условий изопериодического замещения для твердых растворов $A_xB_{1-x}C_yD_zE_{1-y-z}$ проводили в соответствии с [1-3]. Для расчета фазовых равновесий в гетеросистеме GaInPSbAs-InAs использованы уравнения фазового равновесия «жидкость-твердое» в приближении регулярных растворов в интервале температур 773÷973 К. При расчете фазовых равновесий в системе GaInPSbAs-InAs были использованы термодинамические параметры, оцененные в [4, 5]. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

В гетероструктуре $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{P}_x\text{Sb}_y\text{As}_{1-x-y}/\text{InAs}$ с увеличением концентрации P в твердой фазе изопериодические линии смещаются в сторону

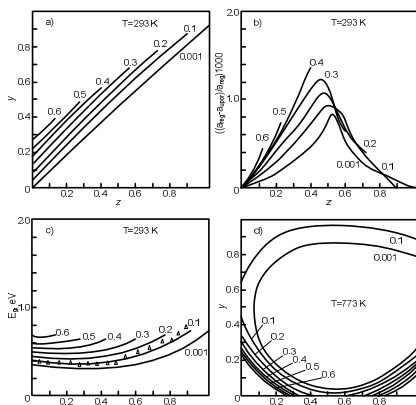


Рис. 1. Результаты расчетов фазовых равновесий в системе GaInPSbAs-InAs

больших концентраций Sb_y (рис. 1а). Отклонение от линейности функции $E_g(z)$ наблюдается в области составов с наибольшим упорядочением (рис. 1б), хотя в данной системе оно не велико. Действительно, величина x_{GaZP_x} и $x_{\text{In}_y\text{Sb}(1-z)}$ ненамного больше единицы.

Наиболее сильно упорядочение влияет на изменение ширины запрещенной зоны от состава (рис. 1в) и в области максимума величины Δ/a зависимость $E_g(z)$ меняет знак.

Расчет спиnodальных изотерм и областей несмешиваемости в гетероструктурах $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{P}_x\text{Sb}_y\text{As}_{1-x-y}/\text{InAs}$ приведен на рис. 1г. Область несмешиваемости существенно расширяется с ростом содержания Sb , и, следовательно, все больше изорпериодических составов попадает в эту область. Расчеты показали, что при снижении температуры ширина области существования твердых растворов GaInPSbAs уменьшается в соответствии со значениями мольных избыточных функций смешения компонентов в твердой фазе.

В заключении отметим, что теоретический анализ фазовых равновесий показал удовлетворительное согласие с экспериментальными данными, что позволяет считать корректным прогноз параметров взаимодействия и адекватности модели расчета гетерофазных равновесий в системе GaInPSbAs-InAs .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-01052.

Литература

1. В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, Т.А. Аскарян. Изв. Вузов «Физика». № 7, с. 41. (1989).
2. В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, Т.А. Аскарян. Изв. Вузов «Физика». № 7, с. 59. (1989).
3. В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, Т.А. Аскарян. Изв. АН СССР. Неорганические материалы. Т. 25, № 4, с. 540. (1989).
4. В.В. Кузнецов, Е.А. Когновицкая, М.Л. Лунина, Э.Р. Рубцов. Журн. физ. химии. Т. 85, № 12, с. 1. (2011).
5. Б.М. Синельников, М.Л. Лунина. Неорганические материалы. Т. 48, № 9, с. 995. (2012).

**ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ НА ПОЛЯРИЗАЦИЮ ИЗЛУЧЕНИЯ
ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ $n\text{-AlGaAs/GaAsP/p-AlGaAs}$**

**Е.В. Богданов, Е.П. Кубашевский, Н.Я. Минина*

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

**EFFECT OF UNIAXIAL COMPRESSION ON THE RADIATION POLARIZATION OF
THE LASER DIODES ON THE BASIS
OF $n\text{-AlGaAs/GaAsP/p-AlGaAs}$**

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

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

Numerical calculations and experimental results show that, for the broad range of tensile strained $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}_{1-y}\text{P}_y/n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures widely used in commercial laser diodes emitting at $766\div 808$ nm, polarization of emitted light may be extremely sensitive to external uniaxial stress due to the change of wave functions symmetry and possible optical transitions in the quantum well levels system. In some heterostructures with quantum well width of 10 nm and phosphorus content below 0.08, TM/TE polarization mode relation showcases a several times decrease and even dominant polarization mode switching under moderate compression of about $5\div 6$ kbar in [100] and [110] directions.

В настоящей работе представлены результаты численных расчетов эффекта влияния на излучение лазерных диодов анизотропных деформаций, которые могут возникнуть в результате внешних механических или температурных воздействий, а также данные экспериментальных исследований поляризации излучения структур с квантовой ямой из $\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$, шириной 14 нм, при одноосном сжатии до 5 кбар вдоль направления [110].

Экспериментально исследованные структуры были выращены методом металлоорганической парофазной эпитаксии на ориентированных в плоскости (100) подложках из легированного кремнием GaAs. Квантовая яма из $\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$ не легировалась. Измерения проводились при температуре 77 К в оптическом криостате с растягивающим устройством, которое позволяло изменять нагрузку непосредственно в жидком азоте. Спектры электролюминесценции при токах через структуру до 30 мА были получены до нагрузок в 5.1 кбар, они демонстрировали полную

обратимость при снятии нагрузки и анализировались с помощью как кристаллического, так и пленочного поляризаторов.

Уравнение Шредингера с гамильтонианом в представлении Латтинжера-Кона с учетом деформационных членов решалось самосогласованно с уравнением Пуассона для электростатического потенциала конечно-разностным методом [1]. В результате численных расчетов спектры размерного квантования, волновые функции и коэффициенты оптического усиления ТМ и ТЕ поляризационных мод g_{TM} и g_{TE} определены для выращенных в направлении [001] гетероструктур $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y/n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием фосфора от $y = 0$ до $y = 0.20$ и шириной квантовой ямы от 4 до 20 нм при одноосном сжатии вдоль кристаллографических направлений [110], [100] и [001] в интервале давлений до 10 кбар. При сжатии в плоскости структуры вдоль направлений [110] и [100] отмечается сильная деформационная зависимость соотношения коэффициентов оптического усиления ТМ и ТЕ мод, в результате чего под давлением возможно переключение излучения с доминирующей ТМ поляризацией к излучению с доминирующей ТЕ поляризацией. Это является следствием сильного изменения энергетического спектра и симметрии уровней в квантовой яме, что приводит к перемешиванию состояний легких и тяжелых дырок и изменяет правила отбора. В случае сжатия вдоль [001] как сами структуры, так и волновые функции симметрию не меняют, соответственно, перемешивания состояний легких и тяжелых дырок в Γ -точке не происходит, а изменение соотношения g_{TM} и g_{TE} обусловлено в этом случае относительным смещением уровней размерного квантования легких и тяжелых дырок. При этом в случае пересечения основных состояний легких и тяжелых дырок также может наблюдаться переключение излучения, но с доминирующей ТЕ поляризации к излучению с доминирующей ТМ поляризацией.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальной работой [2], в которой при сжатии структур с квантовой ямой из $\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$ шириной 14 нм вдоль направления [110] до 5 кбар наблюдается смещение пиков электролюминесценции в голубую область спектра и 2-х-3-х кратный рост их интенсивности, а также подтверждаются полученными экспериментальными данными об изменении поляризации излучения этих структур при одноосном сжатии, согласно которым анизотропия интенсивности излучения I_{TM}/I_{TE} падает приблизительно в 1.5 раза со значения 1.8 в отсутствие нагрузки до примерно 1.2 при $P = 5.1$ кбар.

Литература

1. K.I. Kolokolov, A.M. Savin, S.D. Beneslavski et al., Phys. Rev. B **59**, 7537 (1999).
2. I.V. Berman, E.V. Bogdanov, H. Kissel et al, Phys. Stat. Sol. (b) **246**, 522 (2009).

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В AlGaAs/InGaAs PHEMT
НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ В ВИДЕ
НАНОНИТЕЙ ИЗ АТОМОВ ОЛОВА**

**А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, Р.Р. Галиев*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт
сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук,
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, строение 5,
e-mail: alex.svch@yandex.ru

**ELECTRON TRANSPORT IN ALGAAS/INGAAS PHEMT WITH DOPING PROFILE IN
THE FORM OF TIN NANOWIRES**

**A.E. Yachmenev, A.S. Bugayev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, R.R. Galiev*

Institute of Ultrahigh frequency semiconductor electronics,
Russian academy of sciences
Russia, 117105, Moscow, Nagorny proezd 7/5, e-mail: alex.svch@yandex.ru

The PHEMT on vicinal GaAs 0.3° off substrate with a doping profile in the form of Sn nanowires has been fabricated. Anisotropy of saturation current $I_{\parallel}/I_{\perp} \approx 2.5$ at 300 K was obtained when current flows along and across nanowires. In case of transistor orientation for a current flow along nanowires, higher power gain cut-off frequency $F_{\max\parallel} = 150$ GHz was observed in comparison with orientation for a current flow perpendicular to nanowires $F_{\max\perp} = 117$ GHz.

Актуальной задачей в настоящее время является повышение быстродействия приборов, изготовленных на базе эпитаксиальных наноструктур. Одним из возможных путей для этого является разработка новых типов структур, обеспечивающих увеличение дрейфовой скорости электронов. Использование эпитаксиальных наноструктур с нанонитями (НН) из атомов олова для изготовления приборов может обеспечить увеличение быстродействия за счет уменьшения междолинного рассеяния носителей в канальном слое из-за повышенной скорости эмиссии полярных оптических фононов [1]. В работе впервые получены и исследованы AlGaAs/InGaAs PHEMT наногетероструктуры с профилем легирования в виде НН из атомов олова.

Образцы выращивались на установке МЛЭ Riber 32 P, в качестве подложки использовались пластины GaAs с разориентацией на 0.3° от исходной плоскости (100). Конструкция структур показана на рис. 1. Концентрация дельта-легирования составляет $n_{\text{Sn}} = 1.98 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ для образца № 260 и $2.96 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ для образца № 278.

10.	GaAs : Si	15 нм
9.	Al _{0,24} Ga _{0,76} As	33 нм
8.	i-GaAs	1 нм
7.	δ-Sn (НН)	
6.	i-GaAs	3 нм
5.	Al _{0,24} Ga _{0,76} As	4 нм
4.	i-GaAs	2 нм
3.	In _{0,2} Ga _{0,8} As	12 нм
2.	i-GaAs	0.6 мкм
1.	Подложка GaAs off 0.3°	

Рис. 1. Конструкция РНЕМТ наногетероструктур

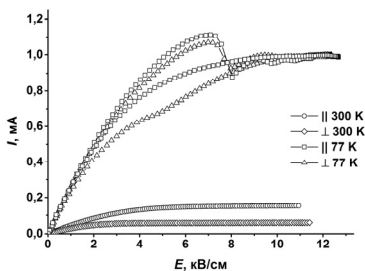


Рис. 2. ВАХ образца №260

Для проведения измерений ВАХ на пластине формировались омические контакты специальной топологии для протекания тока в двух ортогональных направлениях. Кривые ВАХ для РНЕМТ структуры InGaAs/AlGaAs показаны на рис. 2. Полученный коэффициент анизотропии проводимости $k_a = I_{\parallel}/I_{\perp} \approx 2.5$ при $T = 300$ К превышает значение $k_a \approx 1.2$ для гомоэпитаксиальных структур [2]. Понижение температуры измерения до 77 К качественно меняет характер поведения проходящего тока. При тянущем поле напряженностью более 6 кВ/см появляется область отрицательного дифференциального сопротивления, в полях более 8кВ/см анизотропия тока насыщения практически полностью пропадает.

На основе образца №278 были изготовлены тестовые полевые транзисторы с $L_g = 150$ нм в специальной геометрии для протекания тока в ортогональных направлениях. Измеренные СВЧ характеристики также показывают явную анизотропию значений для направлений протекания тока вдоль и поперек НН. Значения F_{\max} составили 150 и 117 ГГц для транзисторов с протеканием тока \parallel и \perp НН, соответственно. Значения MSG на частоте 10 ГГц равнялись 17.7 и 15.5 дБ для транзисторов с ориентацией \parallel и \perp , соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о формировании потенциального рельефа при дельта-легировании атомами олова AlGaAs/InGaAs РНЕМТ структур и перспективности применения таких структур в качестве элементной базы для СВЧ электроники.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-07-00187 А.

Литература

1. J.P. Leburton, J. Appl. Phys. 56, 2850 (1984).
2. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев, Нано- и микросистемная техника, № 12, Стр. 11-12 (2011).

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЕ
КВАНТОВАЯ ЯМА – КВАНТОВЫЕ КОЛЬЦА GaAs/AlGaAs**

**Ю.Д. Сибирмовский, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, И.С. Еремин,
О.С. Коленцова, Н.И. Каргин*

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

**ELECTRON TRANSPORT IN HYBRID SYSTEM QUANTUM WELL –
QUANTUM RINGS GaAs/AlGaAs**

** Yu.D. Sibirmovsky, I.S. Vasil'evskii, A.N. Vinichenko, I.S. Eremin,
O.S. Kolentsova, N.I. Kargin*

National research nuclear university «MEPhI»,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: sibirmovsky@gmail.com

In this work, we study the electron transport through a hybrid system, consisting of a GaAs/AlGaAs quantum well and an array of GaAs double quantum rings grown on top of it. QRs can be used to control the mobility in the QW (velocity-modulation transistor), but unlike quantum dots, their conductivity can also be affected by magnetic field. Several δ -Si doped QW-QRs samples were grown. Despite the fact that droplet epitaxy was conducted at low temperatures (about 350°C), the surface scans and Hall measurements have confirmed the good crystalline quality of the samples. Hall measurements at 300 and 77 K, as well as magnetotransport measurements of the samples were compared to the reference sample without QR to reveal the quantum rings contribution to electron scattering.

Электронный транспорт в неупорядоченных структурах и материалах вызывает интерес достаточно давно.

В данной работе исследуется транспорт в гибридной системе, состоящей из квантовой ямы GaAs/AlGaAs, на поверхности которой выращен слой квантовых колец GaAs (КК). Капельная эпитаксия [1], позволяет варьировать поверхностную концентрацию наноструктур в широких пределах. Это может быть использовано для создания транзистора с модуляцией подвижности [2].

Методом МЛЭ в НОЦ «Нанотехнологии» НИЯУ МИФИ выращена серия образцов, содержащих слой концентрических квантовых колец GaAs, расположенный на поверхности квантовой ямы GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As, δ -Si легированной через верхний спейсер (рис. 1). Так как капельная эпитаксия проводилась при сравнительно низких температурах (350°C для

образца D1), при заравивании слоя квантовых колец первые 10 МС были выращены при той же температуре методом миграционно-усиленной эпитаксии [3]. В данном образце квантовая яма (без учета колец) имела толщину 10 нм, что вдвое меньше чем в опорном образце без колец (20 нм).

В качестве опорного образца была использована НЕМТ гетероструктура $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$, демонстрирующая подвижность электронов $4,2 \cdot 10^5 \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ($1,65 \cdot 10^5 \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) и концентрацию $4,45 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ ($4,7 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$) при $T=4,2 \text{ К}$ (77 К).

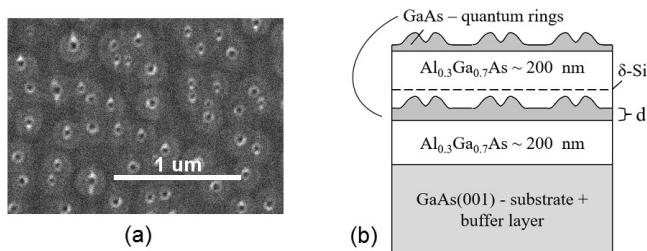


Рис. 1. (а) РЭМ скан поверхности образца D1, (б) слоевая структура образцов

Слоевая концентрация и подвижность электронов для образца D1, измеренные методом Ван-дер-Пау при 300 К (77 К) составили $3,2 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ ($4,7 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$) и $3,3 \cdot 10^3 \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ($4,6 \cdot 10^3 \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), соответственно. Наблюдаемое сильное снижение подвижности электронов при введении в структуру слоя КК связано с возникновением значительной модуляции продольного потенциала в квантовой системе КЯ+КК, вызывающей сильное рассеяние вплоть до локализации части носителей заряда в области КК при их латеральном движении.

Были также проведены измерения электронного магнетотранспорта в квантующем магнитном поле для данного образца. При гелиевых температурах наблюдались осцилляции Шубникова-де Гааза, однако, с меньшей амплитудой и в более сильном магнитном поле.

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

Литература

1. N. Koguchi, S. Takahashi, T. Chikyow, J. Cryst. Growth, 1991, 111, 688.
2. H. Sakaki, Japanese J. Appl. Phys., 1982, 21-2, 6, L381.
3. Y. Horikoshi, M. Kawashima et al., Jpn. J. Appl. Phys., 1988, 27, 169.
4. Yu. D. Sibirmovskii, I. S. Vasil'evskii, A. N. Vinichenko et al., Bull. Lebedev Phys. Inst., 2014, 41, 243.

**МЕТАЛЛОКСИДНЫЕ СВЕРХРЕШЕТКИ
ИЗ САМООРГАНИЗОВАННЫХ СТОЛБИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР**

**А.Н. Плиговка, Г.Г. Горох*

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

**METAL-OXIDE SUPERLATTICES FORMED FROM
THE SELF-ORGANIZED COLUMNAR NANOSTRUCTURES**

**A.N. Pligovka, G.G. Gorokh*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013 Minsk, str. P. Brovki 6, e-mail: pligovkaandrei@gmail.com

Self-organized columnar metal-oxide superlattices were created by electrochemical anodization of sputter-deposited Al/Ta and Al/Nb bilayer systems on silicon wafers. After selective removal of anodic alumina the ordered column matrixes of tantalum and niobium were formed on the substrate surface. The geometrical parameters of the matrixes (height, diameter, and period columns) can be varied within a wide range by changing the conditions of formation. The established correlation between the microgeometric parameters and electrochemical process modes allows controllable to form a lattice with the specified characteristics. These columnar periodic superlattices can be successfully used as 1D, 2D or 3D photonic crystals.

Одним из направлений современной оптики является создание и исследование микроструктур с фотонной запрещенной зоной или фотонных кристаллов [1], представляющих собой свехрешетки, в которых искусственно создано дополнительное поле с периодом на порядки превышающим период основной решетки. Конечной целью физики фотонных кристаллов остается создание трехмерных систем. Как нельзя лучше для реализации данной цели подходят наноструктуры, создаваемые на основе пористого оксида алюминия (АОА). В работе показано, как методами электрохимического анодирования через поры матриц АОА можно сформировать столбиковые свехрешетки из металлооксидов тантала и ниобия, которые могут быть использованы в качестве одномерных, двумерных или трехмерных фотонных наносистем.

Для формирования двумерных металлооксидные свехрешеток на кремниевые пластины методом магнетронного напыления наносили двухслойные системы Al/Ta и Al/Nb. После чего в 0,2 М водном растворе щавелевой кислоты при напряжении 53 В проводили формирования пористого АОА, а затем в 0,5 М водном растворе борной кислоты через

поры АОО анодировали подслоем тантала и ниобия до напряжений от 100 до 450 В. Процесс анодирования проходил таким образом, что слои тантала и ниобия, окисляясь заполняли поры АОО, а их высота зависела от установленного напряжения. После чего в 50 % растворе ортофосфорной кислоты при температуре 50°C проводилось полное удаление АОО. В результате была сформирована двумерная наностолбиковая металлооксидная свехрешетка как показано на рисунке 1.

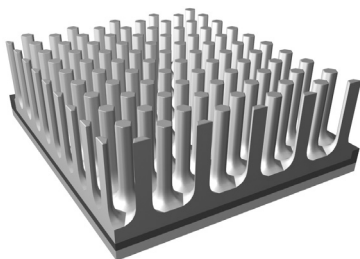


Рис. 1. Столбиковая свехрешетка

Установлено [2, 3], что диаметры наностолбиков могут управляемо варьироваться от 70 до 400 нм, высота – от 80 нм до 1,5 мкм, а период расположения на подложке – от 100 до 600 нм, причем взаимное соотношение перечисленных параметров может быть управляемого изменено даже в пределах одного и того же образца. Диапазон физических размеров наностолбиков из анодного оксида тантала

и ниобия может быть расширен как в сторону больших, так и в сторону меньших величин, предположительно от 5 нм до 1,5 мкм, обеспечивая, таким образом, принципиальную возможность использования данных структур в УФ, видимом и ИК диапазонах. Удачным дополнением тантала и ниобия могут стать также анодные оксиды некоторые других вентильных металлов, например, титана, гафния или циркония, имеющих потенциально высокую диэлектрическую проницаемость и, следовательно, показатель преломления. Второе важное преимущество перечисленных оксидов состоит в том, что все они могут быть сформированы в порах АОО методами высоковольтного анодирования соответствующих двухслойных композиций: Al/Nb, Al/Ti, Al/Hf, Al/Zr, т.е. без применения сложных и дорогостоящих вакуумных методов осаждения или золь-гель технологии.

Комбинируя операции вакуумного напыления тонких пленок вентильных металлов, фотолитографии, наноиндентации и последовательного анодирования, будет возможно создать микро- и наноструктуры с полной трехмерной запрещенной фотонной зоной в виде многослойных периодических сочетаний наноструктур и воздушных промежутков.

Литература

1. Optical Materials, 42, 2015, P. 72–79.
2. Плиговка А.Н., Горох Г.Г., Лозовенко А.А. КрыМиКо'2015 – Т. 1. – С. 649-652.
3. Плиговка А.Н. и др. Наноструктуры в конденсированных средах. – 2015. – С. 120-140.

**ИОННО-ЛУЧЕВАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ
УПРУГОНАПРЯЖЕННЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР InAs-QD/GaAs**

С.Н. Чеботарев^{1,2}, В.А. Ирха¹, Г.А. Еримеев¹, А.Н. Яценко¹

¹Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, дом 132
²Южный научный центр РАН, 344006, г. Ростов-на-Дону, улица Чехова, дом 41,
e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com

**ION-BEAM CRYSTALLIZATION
OF STRAINED InAs-QD/GaAs NANOHETEROSTRUCTURES**

S.N. Chebotarev^{1,2}, V.A. Irkha¹, G.A. Erimeev¹, A.N. Yatsenko¹

¹Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
Russia, 346428, Novocherkassk, Prosvchsheniya str. 132
²Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences
Russia, 344006, Rostov-on-Don, Chekhova str. 41,
e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com

A new ion-beam crystallization technique for obtaining InAs-QD/GaAs strained nanoheterostructures is proposed. It is shown that the penetration of the quantum dots results in a reduction of mechanical stress, which is reflected in the Raman spectra as LO-offset characteristic peaks.

Наноструктуры с пространственным ограничением транспорта носителей заряда представляют интерес ввиду значительного потенциала их применения в оптоэлектронных устройствах: светодиодах, лазерах и фотоэлектрических преобразователях.

Получение экспериментальных образцов осуществляли методом ионно-лучевой кристаллизации [1-3]. На подложку GaAs(001) при температуре 580°C наносился 0,5 мкм буферный слой GaAs. Самоорганизованный рост массива КТ осуществлялся из распыленного потока InAs при температуре подложки 480°C со скоростью 0,2 МС/с. Толщина InAs «квасислоя» равнялась 2,5 нм. Прерывание процесса роста осуществлялось стоп-экраном. Затем на полученный слой InAs квантовых точек при температуре 450°C со скоростью 0,1 МС/с наносился покровный слой GaAs разной толщины. В результате были получены три образца (S1, S2, S3) с толщинами покровного слоя (или иначе глубиной залегания квантовых точек) 10, 20 и 50 нм, соответственно.

Исследование морфологии поверхности образцов проводилось на атомно-силовом микроскопе Solver HV. Изучение смачивающих слоев и отдельных квантовых точек проводили на просвечивающем электронном

микроскопе Tecnai G2 Spirit. Спектры комбинационного рассеяния измеряли на InVia Raman спектрометре.

К сожалению, прямые методы измерения упругой деформации на поверхности полупроводниковых гетероструктур с внедренными квантовыми точками отсутствуют.

Качественно о наличии упругих деформаций можно судить по сдвигу *LO*-пиков КТ на спектрах комбинационного рассеяния. Из рис. 1,а видно, что усредненная высота КТ составляет 4 нм. Рис. 1,б отражает спектр комбинационного рассеяния образца *S1*.

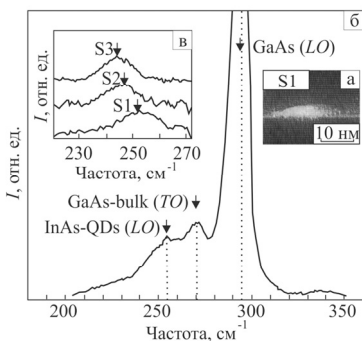


Рис. 1. ПЭМ-изображение КТ для образца *S1* (а); спектр комбинационного рассеяния образца *S1* (б); фоновые спектры образцов *S1*, *S2*, *S3* с различной глубиной залегания КТ (в)

Наблюдается интенсивный пик при 295 см^{-2} , обусловленный рассеянием *LO* фононов подложки GaAs при $x(yz)\bar{x}$ поляризации. Слабый пик при 270 см^{-2} отвечает рассеянию на *TO* фононах GaAs. Правее при 254 см^{-2} различим пик комбинационного рассеяния на КТ InAs. На рис. 1,в приведены спектры комбинационного рассеяния для образцов *S1*, *S2* и *S3*, с разной глубиной залегания квантовых точек. Смещение пиков обусловлено уменьшением упругих напряжений в слоях с квантовыми точками. Увеличение глубины залегания приводит к тому, что пики дрейфуют к *LO* фоновому рассеянию на недеформированном арсениде индия при 242 см^{-2} .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии №14.576.21.0033, уникальный идентификатор RFMEFI57614X0033), Совета по грантам Президента РФ (грант МК-5115.2016.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-08-08263-а).

Литература

1. S.N. Chebotarev et al., Tech. Phys. Lett. **41**, 102 (2015).
2. S.N. Chebotarev et al., Tech. Phys. Lett. **39**, 726 (2013).
3. S.N. Chebotarev et al., Journal of Nanotechnology. 5340218 (2016).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОСЕВЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ ГРУПП АЗВ₅,
СИНТЕЗИРУЕМЫХ ПО МЕХАНИЗМУ
«ПАР-ЖИДКОСТЬ-КРИСТАЛЛ»**

** А.А. Корякин^{1,2}, Н.В. Сибирев^{1,2}, В.Г. Дубровский^{1,2}*

¹Санкт-Петербургский Академический университет, 194021, г. Санкт-Петербург, Россия,
ул. Хлопина, дом 8, корп. 3, e-mail: office@spbau.ru

²Университет ИТМО, Россия, 197101, г. Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., дом 49, e-mail: news@isu.ifmo.ru

**MODELING OF AXIAL HETEROSTRUCTURE FORMATION
IN SEMICONDUCTOR A₃B₅ NANOWIRES GROWN
BY VAPOR-LIQUID-SOLID METHOD**

** A.A. Koryakin^{1,2}, N.V. Sibirev^{1,2}, V.G. Dubrovskii^{1,2}*

¹St. Petersburg Academic University, Russia, 194021 St.Petersburg, Ul. Khlopinina 8/3,
e-mail: office@spbau.ru

²ITMO University, Russia, 197101 St. Petersburg, Kronverkskiy pr. 49,
e-mail: news@isu.ifmo.ru

A model of axial heterostructure formation in ternary A³B⁵ nanowires grown via vapor-liquid-solid method was proposed. The approach is based on the determination of chemical potential of the four-component catalyst droplet using the regular solution model. Our model allows the estimation of the heterojunction width dependence on the growth temperature, material fluxes and nanowire radius. The Au-catalyzed Al_xGa_{1-x}As nanowire formation was considered as an example of ternary system. The opportunity to form axial heterostructures in Al_xGa_{1-x}As nanowires obtained via an alteration of As flux only was theoretically predicted.

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК) групп А³В⁵ с осевыми гетеропереводами являются объектом интенсивных исследований в связи с их потенциальным применением в электронных и оптоэлектронных приборах. Чтобы обеспечить высокую производительность работы прибора, обычно требуется создать максимально резкий гетеропереход, ширина которого зависит от условий формирования ННК: потоков вещества, температуры подложки, используемых полупроводниковых материалов и метода роста. Одним из наиболее распространенных методов роста ННК является рост по механизму «пар-жидкость-кристалл» (ПЖК). В тоже время самосогласованной модели роста, описывающей формирование осевых гетеропереходов в многокомпонентных ННК (с числом компонент большим двух), синтезируемых ПЖК методом,

насколько нам известно, не существует. Это связано с трудностью построения фазовых диаграмм многокомпонентных растворов. В настоящей работе был развит подход, позволяющий построить модель формирования гетеропереходов в трехкомпонентных ННК, синтезируемых по механизму ПЖК. В качестве примера материальной системы рассмотрен рост Au-каталитических $Al_xGa_{1-x}As$ ННК.

Движущей силой роста ННК является разность химических потенциалов атомов, растворенных в капле катализатора, и атомов в твердой фазе. Для расчета разности химических потенциалов капля рассматривалась как четырехкомпонентный регулярный раствор. Коэффициенты взаимодействия атомов вычислялись по формуле Стрингфеллоу [1]. Считая, что рост ННК происходит в послыном моноцентрическом режиме, определялась скорость роста ННК [2]. Уравнения материального баланса для Al, Ga и As были написаны с учетом трех вкладов: прямого потока вещества в каплю катализатора, испарения из капли и ухода вещества из капли за счет нуклеации. Изменяя величины потоков вещества, возможно, моделировать процесс формирования гетероперехода. Таким образом, была построена модель, позволяющая находить ширину гетеропереходов в трехкомпонентных ННК как функцию температуры подложки (рис. 1), потоков вещества и радиуса ННК. Также продемонстрирована возможность формирования гетеропереходов в $Al_xGa_{1-x}As$ ННК путем изменения потока мышьяка (рис. 2).

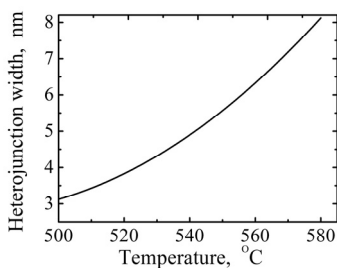


Рис. 1. Зависимость ширины гетероперехода AlGaAs/GaAs от температуры

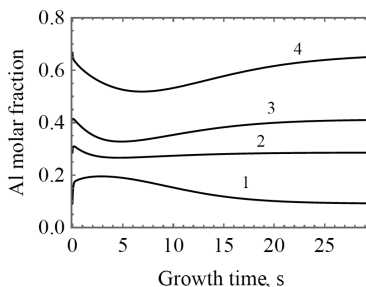


Рис. 2. Зависимость молярной доли алюминия в $Al_xGa_{1-x}As$ ННК от времени при увеличении потока мышьяка в два раза (при $t = 0$) для различных потоков алюминия: 0.1, 0.4, 0.7, 2.0 монослоя в секунду (линии 1, 2, 3, 4, соответственно)

Литература

1. J. C. Stringfellow, J. Phys. Chem. Solids **33**, 665 (1972).
2. V. G. Dubrovskii and N. V. Sibirev, Phys. Rev. E **70**, 031604 (2004).

**ВЛИЯНИЕ ДЕСОРБЦИИ ГАЛЛИЯ НА СТРУКТУРУ И МОРФОЛОГИЮ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СЛОЕВ AlGaN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
АММИАЧНОЙ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

**И.О. Майборода, Ю.В. Грищенко, И.С. Езубченко, М.Л. Занавескин,
М.Ю. Пресняков, Е.А. Вавилова*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Россия, 123098, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, e-mail: mrlbr@mail.ru

**THE EFFECT OF Ga DESORPTION ON STRUCTURE
AND MORPHOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE AlGaN
FILMS GROWN BY NH₃ MBE**

**I.O. Maiboroda, Yu.V. Grishchenko, I.S. Ezubchenko, M.L. Zhanaveskin, M.Yu. Presniakov,
E.A. Vavilova*

National Research Center "Kurchatov intitute"
Russia, 123098, Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1, e-mail: mrlbr@mail.ru

The growth of high-temperature AlGaN by NH₃ MBE under strong Ga desorption conditions was studied by means of reflective high-energy electron diffraction (RHEED), atomic force microscopy (AFM), X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (TEM). It was shown that strong desorption of Ga has led to enhancement of lateral growth component. Obtained AlGaN films had better surface morphology and structural quality compared to AlN films grown at same conditions. The model of AlGaN growth under strong Ga desorption was developed.

Уникальное сочетание физических свойств нитридов алюминия и галлия сделало данные материалы крайне востребованными в микроэлектронике. В то же время высокая плотность дефектов и развитая морфология эпитаксиальных гетероструктур, выращиваемых на подложках, расогласованных по параметрам кристаллической решетки, по-прежнему является одним из основных факторов, ограничивающих рабочие характеристики устройств на базе нитридов. Таким образом, задача поиска способов улучшения морфологии и кристаллического совершенства гетероструктур нитридов по-прежнему остается актуальной.

Мотивацией к проведению данного исследования послужили результаты, опубликованные в работе [1], авторами которой было показано, что рост высокотемпературных слоев AlN методом MOCVD с использованием галлия в качестве сурфактанта позволяет получить пленки AlN исключительного кристаллического совершенства с атомарно-гладким рельефом. Из-за более слабой, чем у алюминия связи атомов галлия с азо-

том, повышение температуры роста AlGaIn приводит к активной десорбции галлия из растущей пленки. При достаточно высокой температуре подложки атомы галлия перестают встраиваться в растущую пленку, однако, как показано в [1], могут влиять на кинетику ростового процесса.

В ходе данной работы впервые был исследован рост AlGaIn методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии в режиме активной десорбции галлия. Была определена зависимость скорости роста слоев AlGaIn от температуры подложки, на основе анализа элементарной кинетики ростового процесса построена математическая модель, описывающая данную зависимость. При изучении образцов пленок AlGaIn методами атомно-силовой микроскопии, дифракции быстрых отраженных электронов, рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии было обнаружено усиление латеральной компоненты роста пленок в режиме активной десорбции галлия.

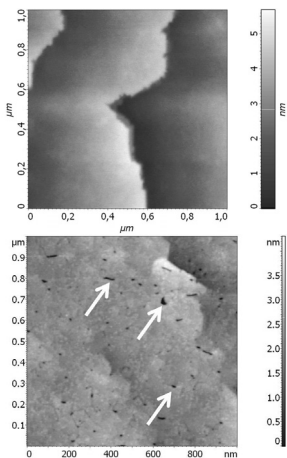


Рис. 1. АСМ изображения поверхности образцов AlGaIn (слева) и AlN (справа). На поверхности AlN видны выходы проникающих пор (показаны стрелками)

на подложках сапфира.

Литература

1. Т. М. Altahtamouni, et al., J. Phys. D: Appl. Phys., **45**, 285103 (2012).

**ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ СЛОИ AlN НА ПОДЛОЖКАХ САПФИРА,
ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ АММИАЧНОЙ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

**И.С. Езубченко, Ю.В. Грищенко, И.О. Майборода, М.Л. Занавескин*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, e-mail: ezivan9@gmail.com

**HIGH-QUALITY AlN LAYERS OBTAINED BY AMMONIA MOLECULAR
BEAM EPITAXY**

**I.S. Ezubchenko, Yu.V. Grishchenko, I.O. Mayboroda, M.L. Zhanaveskin*

National Research Center «Kurchatov institute»
Russia, 123182, Moscow, Akademika Kurchatova pl. 1, e-mail: ezivan9@gmail.com

The approach to the formation of high-quality AlN layers by ammonia molecular beam epitaxy has been proposed. In this approach, the final film of the AlN consisted from two layers: 10 nm of the low temperature AlN and 300 nm of the high temperature AlN grown with high flow of ammonia. The film had a surface with RMS 2 Å (Figure 1). FWHM of diffraction peak for this film was 120 arcsec.

Полупроводниковые соединения нитрида алюминия, нитрида галлия и их твердые растворы – материалы, хорошо зарекомендовавшие себя в производстве СВЧ устройств [1]. За счет наличия в данных материалах эффектов спонтанной и пьезоэлектрической поляризации на гетерогранице AlGaN/GaN возникает двумерных газ электронов высокой подвижности, который может быть использован в качестве проводящего канала транзистора с высокой подвижностью электронов. Отсутствие коммерчески доступных «родных» подложек для эпитаксиального роста пленок нитридов приводит к необходимости использовать рассогласованные по параметру решетки подложки (SiC, Si, сапфир). Из-за различия периодов решетки возникают тангенциальные напряжения, которые релаксируют, образуя различные дефекты. Возникающие на начальной стадии формирования гетероструктуры дефекты значительно снижают подвижность электронов в двумерном канале [2, 3]. Таким образом, рост высококачественных начальных слоев является одним из ключевых факторов для формирования качественных гетероструктур для нитридной электроники.

В данной работе мы сообщаем о разработанном подходе к формированию слоев AlN, который позволяет на подложках сапфира методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии получить слои высокого

кристаллического совершенства с рекордно низкой для данного метода среднеквадратичной шероховатостью на уровне 2 \AA . Подход заключается в использовании специфических параметров нитридации подложки сапфира, использовании высоких потоков аммиака и применении двухстадийного роста с различными температурами осаждения на каждой из стадий. На первой стадии формировался низкотемпературный зародышевый слой AlN толщиной 10 нм. На второй стадии была выращена пленка высокотемпературного AlN толщиной 300 нм. Исследование поверхности выращенной пленки в атомно-силовом микроскопе (АСМ) показали, что

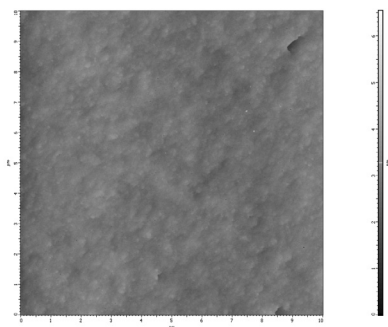


Рис. 1. АСМ изображение поверхности пленки AlN. Размер скана $10 \times 10 \text{ мкм}$

пленка имеет атомарно-гладкий рельеф с шероховатостью равной 2 \AA (рис. 1). Ширина пиков рентгеновской дифракции в отражении (0002) составила 120 угловых секунд, что говорит о высоком структурном совершенстве пленки. На основе выращенных пленок были сформированы гетероструктуры для транзисторов с высокой подвижностью электронов, которые показали значение подвижности электронов в двумерном канале равное $1800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Таким образом, впервые методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии были получены высококачественные пленки AlN с рекордно низкой шероховатостью поверхности. Полученные пленки могут быть использованы как качественные темплеты для формирования гетероструктур для транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Литература

1. Федоров Ю.В., ЭЛЕКТРОНИКА: Наука. Технология. Бизнес, **2**, с. 92 (2011).
2. R. Oberhuber et. al., Appl. Phys. Lett., **73**, p. 818 (1998).
3. Nils G. Weimann et. al., J. Appl. Phys., **83**, p. 3656 (1998).

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК EuSi_2 , ЭПИТАКСИАЛЬНО
СОПРЯЖЕННЫХ С КРЕМНИЕМ**

**Д.В. Аверьянов^{1,2}, К.Г. Каратеева¹, И.А. Каратеев¹, Г.В. Пруцков¹,
О.Е. Парфёнов¹, А.Н. Талденков¹, А.М. Токмачёв¹, А.Л. Васильев¹,
В.Г. Сторчак¹*

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

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

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF EuSi_2 THIN FILMS EPITAXIALLY
INTEGRATED WITH SILICON**

**D.V. Averyanov^{1,2}, C.G. Karateeva¹, I.A. Karateev¹, G.V. Prutskov¹, O.E. Parfenov¹,
A.N. Taldenkov¹, A.M. Tokmachev¹, A.L. Vasiliev¹, V.G. Storchak¹*

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

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

Nowadays, metal silicides are an integral part of microelectronics being used as ohmic and Schottky barrier (SB) contacts, interconnects, gate electrodes or diffusion barriers [1].

Rare-earth silicides make a special class of materials with a low SB height to *n*-Si. This property ensures their use as source/drain terminals in the SB metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFET) technology [2] combining advantages of low parasitic resistance, small junction depth, high channel mobility. The device scaling to sub-10 nm gate lengths requires atomically abrupt junctions as well as the epitaxial quality of silicide layers.

Here, we propose EuSi_2 as a new multifunctional material for contacts with Si in nanoelectronics and spintronics, and present MBE-grown EuSi_2/Si epitaxial junction characterized by RHEED, XRD, analytical electron microscopy, magnetization and transport measurements. Structural perfection leads to superb conductivity and a record-low SB (0.21 eV) with *n*-Si while antiferromagnetic phase ensures spin transport.

В настоящее время силициды металлов являются неотъемлемой частью микроэлектронных устройств и используются в качестве омических контактов, контактов с барьером Шоттки, а также материалов разводки, электрода затвора, диффузионных барьеров.

Силициды редкоземельных металлов принадлежат к особому классу материалов, образующих низкий барьер Шоттки в контакте с n-Si. Это свойство обеспечивает возможность их использования в качестве контактов истока/стока в технологии производства полевых МОП-транзисторов, имеющих преимущества более низкого паразитного сопротивления, малой глубины перехода и высокой подвижности носителей в канале. Однако необходимость масштабирования вплоть до суб-10 нм длин канала требует атомарно-гладких границ раздела и эпитаксиального качества формируемых слоев силицида.

В данной работе приводятся результаты исследования слоев нового материала для устройств электроники и спинтроники EuSi_2 , сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии путем осаждения атомов Eu на поверхность нагретой пластины Si, описываются режимы их роста.

Картинки дифракции быстрых электронов, снимаемые на протяжении всего процесса формирования, показывают отсутствие каких-либо посторонних фаз, в то же время, рефлексы от EuSi_2 имеют форму стержней со слабой продольной модуляцией интенсивности, что говорит о предпочтительном двумерном росте монокристаллической пленки.

Исследование изготовленных структур с помощью рентгеновской дифрактометрии свидетельствует о том, что они являются монокристаллическими и имеют ориентацию (001) в направлении перпендикулярном поверхности, посторонние фазы отсутствуют. Осцилляции интенсивности рефлексов указывают на резкую границу раздела EuO/Si .

Отсутствие посторонних фаз в объеме пленки, а также нетривиальная для использованного метода изготовления структур резкость границы раздела также подтверждаются изображениями просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения.

Измеренная высота барьера Шоттки на интерфейсе $\text{EuSi}_2/\text{n-Si}$ составляет 0,21 эВ и является наименьшей среди всех силицидов, что подтверждает перспективность использования материала в устройствах кремниевой нанoeлектроники. Антиферромагнитные свойства EuSi_2 , исследованные с помощью СКВИДа, также предполагают возможность его использования в устройствах спинтроники.

Литература

1. L.J. Chen, JOM **57**, 24-30 (2005).
2. J.M. Larson and J.P. Snyder, IEEE Trans. Electron Devices **53**, 1048-1058 (2006).

**ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ ПЛЁНОК InGaAs
В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ РЕЖИМЕ
НА ПОДЛОЖКАХ InP (100) И (411)A**

**С.С. Пушкарёв¹, Г.Б. Галиев¹, М.М. Грехов², Е.А. Климов¹, А.Н. Клочков¹,
О.С. Коленцова², А.Л. Васильев³, И.Н. Трункин³*

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр. 5,
e-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: mmgrekhov@mephi.ru

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1,
e-mail: a.vasiliev56@gmail.com

**LOW-TEMPERATURE EPITAXIAL GROWTH OF InGaAs FILMS ON InP (100)
AND (411)A SUBSTRATES**

**S.S. Pushkarev¹, G.B. Galiev¹, M.M. Grekhov², E.A. Klimov¹, A.N. Klochkov¹,
O.S. Kolentsova², A.L. Vasiliev³, I.N. Trunkin³*

¹Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS
Russia, 117105, Moscow, Nagorni proezd 5/7, e-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

²National Research Nuclear University «MEPhI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe highway 31, e-mail: mmgrekhov@mephi.ru

³National Research Centre “Kurchatov Institute”
Russia, 123182, Moscow, Academic Kurchatov square 1,
e-mail: a.vasiliev56@gmail.com

The influence of V/III beam ratio and substrate orientation on the crystal structure features of LT-In_{0,53}Ga_{0,47}As films was investigated by means of atomic-force microscopy, high-resolution X-ray diffractometry, transmission electron microscopy and transmission scanning electron microscopy. V/III beam ratio is found to be more critical growth parameter to LT-In_{0,53}Ga_{0,47}As crystal quality as compared with substrate orientation: (100) or (411)A.

Эпитаксиальный InGaAs, выращенный при пониженной температуре (low-temperature InGaAs, LT-InGaAs), благодаря крайне малому времени жизни фотовозбуждённых носителей заряда (менее пикосекунды) может быть использован для изготовления фотопроводящих антенн – генераторов и детекторов гигагерцового и терагерцового излучения [1]. Преимущество LT-InGaAs над также используемым для этих целей LT-GaAs заключается в возможности использования для фотовозбуждения фемтосекундными импульсами более длинноволнового эрбиевого лазера (с длиной волны 1,56 мкм), во многом более доступного и удобного, чем более

коротковолновый титан-сапфировый лазер (с длиной волны $\sim 0,8$ мкм) [2]. Ширина запрещённой зоны GaAs 1,424 эВ, а $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ – 0,817 эВ.

В настоящей работе исследуются плёнки $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ толщиной 1,2 мкм, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии при температуре 200 °С на подложках InP с различной кристаллографической ориентацией поверхности: (100) и (411)А. Плёнки были как нелегированными, так и легированными кремнием. Для улучшения кристаллического совершенства выращенные плёнки были отожжены в потоке мышьяка при 500°С в течение часа.

Исследования поверхности плёнок методом атомно-силовой микроскопии показали, что плёнки, выращенные при малом потоке As_4 ($P_{\text{As}_4}/P_{\text{Ga, In}} = \gamma = 29$), обладают умеренно шероховатой поверхностью ($R_q = 4 \div 9$ нм), а при увеличении потока As_4 ($\gamma = 90$) шероховатость поверхности плёнок значительно возрастает ($R_q = 14 \div 16$ нм). При этом использование несингулярных подложек InP (411)А несколько увеличивает шероховатость поверхности и приводит к тому, что мелкие зёрна ($0,2 \div 0,3$ мкм) группируются в более крупные агломераты неправильной формы ($0,8 \div 1,6$ мкм).

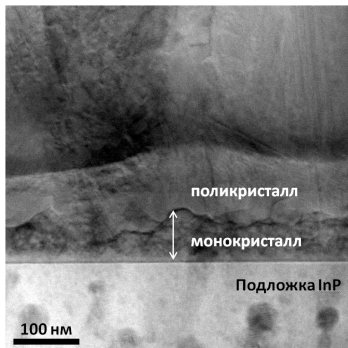


Рис. 1. Светлопольное ПРЭМ-изображение образца 985-0 (плёнка $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ на подложке InP (100), выращенная при $\gamma = 90$, после отжига)

Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии и дифракции электронов показали, что плёнки, выращенные при $\gamma = 29$ на подложках (100), являются монокристаллическими, а на подложках (411)А – тоже монокристаллическими, но с большой концентрацией дефектов упаковки. Плёнки, выращенные при $\gamma = 90$, являются почти полностью поликристаллическими, наблюдается тонкая монокристаллическая область над подложкой толщиной ~ 100 нм (рис. 1).

Данная работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации СП-686.2016.3.

Литература

1. I. Kostakis et al., J. Appl. Phys. **111**, 103105 (2012).
2. A. Takazato et al., Appl. Phys. Lett. **91**, 011102 (2007).

**ТЕРМИЧЕСКОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ SiC
НА ПЛАСТИНАХ КРЕМНИЯ С SiGe БУФЕРАМИ**

**П.И. Гайдук*

Белорусский государственный университет,
Беларусь, 220030, г.Минск, пр-т Независимости, дом 4,
e-mail: gaiduk@bsu.by

**THERMAL GROWTH OF EPITAXIAL SiC ON SI WAFER WITH SiGe
BUFFER LAYERS**

**P.I. Gaiduk*

Belarusian State University

Belarus, 220030, Minsk, prosp. Nezavisimosti, 4, e-mail: gaiduk@bsu.by

Epitaxial growth of SiC layers on the Si substrates is of huge importance for various device applications. The problem is that high lattice misfit results in extended defect formation and strain accumulation in the SiC/Si structures. Buffer layers are expected to solve the problem of SiC defect-free epitaxial growth. We report the results of solid phase epitaxy during vacuum carbonization of Si substrate with incorporated SiGe buffer layers. The mechanisms of epitaxial growth and strain relaxation are discussed as a function of temperature and vacuum conditions.

Тонкие эпитаксиальные слои карбида кремния (SiC) интересны не только для непосредственных приборных применений в силовой и оптоэлектронике, но и для формирования гетероэпитаксиальных структур с пленками других широкозонных полупроводников (GaN, AlN, ZnO) на подложке кремния [1–3]. Получение высококачественных слоев SiC на пластинах Si является сложной научно-технологической задачей, поскольку большое несоответствие параметров решеток (~20%) приводит к упругим напряжениям и протяженным дефектам.

В настоящем сообщении будут приведены результаты исследований формирования гетероструктур SiC/Si с использованием методов твердофазной эпитаксии при высокотемпературной вакуумной карбидизации кремния в вакууме с добавлением углеродсодержащих газовых молекул. С применением этого подхода удастся существенно уменьшить упругие напряжения и, тем самым, избежать возникновения трещин и крупных нерегулярностей структуры. Материал подложки Si непосредственно участвует в химической реакции с образованием SiC. Однако при этом

происходит образование точечных дефектов: вакансий и междоузельных атомов углерода, которые являются центрами дилатации в кристалле Si [4]. В системе Si-SiC эти дефекты становятся эффективными каналами для релаксации упругих напряжений.

Для эффективного управления процессами перераспределения и взаимодействия дилатационных центров могут быть использованы поля упругих деформаций гетероструктур SiGe/Si вблизи границы гетероэпитаксиального роста. Как установлено в наших ранних исследованиях [5,6], упруго-деформированные (сжатые) тонкие слои SiGe, инкорпорированные в Si-матрицу, способны аккумулировать вакансии и низко-размерные атомы примеси, тогда как прилегающие упруго-растянутые слои Si являются местом накопления собственных междоузельных атомов. Тем самым, происходит формирование двумерных дилатационных структур, состоящих из массивов вакансий с одной (сжатой) стороны слоев Si/SiGe и атомов междоузельного типа – с другой. При последующей термообработке, вакансии и низко-размерные атомы трансформируются в нано-пустоты, которые организуются исключительно в напряженных слоях SiGe [5, 6]. Для самоорганизованного формирования нанопустот использованы следующие ключевые процессы: эпитаксиальный рост напряженных структур Si/SiGe/Si с последующим облучением легкими ионами (водород, гелий, углерод) и быстрым термическим отжигом. Упруго-деформированные гетероструктуры с нанопустотами использовались в качестве геттеров для сегрегации и самосборки металлических или углеродных наноточек. В настоящей работе поверхностные структуры Si/SiGe использованы для выращивания слоев эпитаксиального SiC на кремниевых подложках.

В докладе будут обсуждаться возможные механизмы эпитаксиального роста и релаксации упругих напряжений при твердофазной эпитаксии в различных температурных и вакуумных условиях карбидизации, а также возможные способы управления процессами гетероэпитаксии с помощью буферных структур SiGe/Si.

Литература

1. Silicon Carbide: Mater.Proc. and Devices, Ed. by Z.C.Feng., N.Y., 2004.
2. A.Fissel, Physics Reports. **379**, 149 (2003).
3. I.A.Skibarko, O.V.Milchanin, P.I.Gaiduk et.al. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE. Inst.Phys.Conf.Ser. No 166, Ch.7, p. 465-469.
4. С.А.Кукушкин, А.В.Осипов ФТТ. **56**, 761 (2014).
5. P.I.Gaiduk et.al. Phys. Rev. B. **67**, 235310 and 235311 (2003).
6. P.I. Gaiduk and A.N. Larsen. Phys.Stat.Sol. A **211**, 2455 (2014).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ УГЛЕРОДА
В МАТРИЦУ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

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

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

**RESEARCH OF THE IMPLEMENTATION PROCESS OF CARBON
IN THE MATRIX OF POROUS SILICON**

**A.O. Sultanov, N.V. Siglovaya, G.K. Safaraliev, N.I. Kargin, A.S. Gusev*

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

In this work the process of carbonization of porous silicon layer was studied. Silicon substrates were subjected to the electrochemical etching followed carbonization at 1100°C. As a result series of experimental SiC/por-Si structures was received. The reorganization of the pore system was revealed under the influence of the counter-flow of the silicon atoms to the inner surface of the SiC layer. The dependence of the square of the thickness of epitaxial SiC films from the carbonization time was examined.

Карбидизация подложек кремния с пористым слоем является одним из перспективных направлений в технологии буферных слоев для последующей эпитаксии пленок нитридов III-группы [1].

В работе исследовался процесс диффузии атомов углерода при высоких температурах в карбидизированной пористой матрице.

Подложки кремния Si (100) подвергались электрохимическому травлению в водном растворе плавиковой кислоты $\text{HF:H}_2\text{O:CH}_3\text{CN(OH)CH}_3 = 1:3:1$. После промывки, проводилась карбидизация образцов с помощью установки EPIC CVD. Поток этилена (C_2H_4) в 15 ст. см³/мин подавался в CVD реактор при температуре подложек 1100°C.

На рис. 1 представлены изображения торцевой поверхности образцов с пористым слоем, полученные с помощью растрового электронного микроскопа. Изображения получены после электрохимической обработки (рисунок 1а) и после процесса карбидизации в CVD реакторе (рис. 1б).

Как видно из рис. 1, карбидизация образцов приводит к трансформации пористой структуры в связи с потоком атомов кремния к внутренней поверхности роста слоя карбида кремния. Вследствие чего происходит зарастание пор. На границе между пористым слоем и растущим слоем карбида кремния происходит коагуляция пор в более крупные, сфериче-

ской формы, диаметром до 1 мкм, что авторы [2] связывают с влиянием поля температуры.

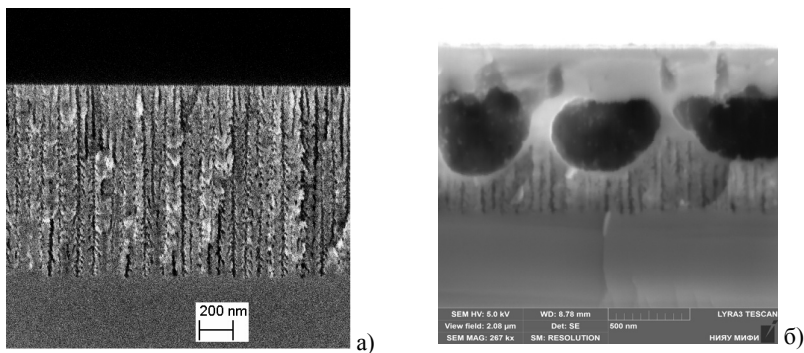


Рис. 1. Изображения профиля подложек por-Si
а) до и б) после карбидизации при 1100°C

Был синтезирован экспериментальный ряд с различным временем карбидизации. Получена линейная зависимость квадрата высоты эпитаксиальных пленок SiC от времени карбидизации. По углу наклона определен коэффициент диффузии атомов углерода в карбиде кремния при температуре 1100°C.

Литература

1. V.S. Stepanyuk et al., Phys. Rev. B **68**, 205410 (2003).
2. В.В. Трегулов, Пористый кремний: Технология, Свойства. Применение. Монография, (2011).

**УПРАВЛЯЕМОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК
В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

**А.С. Пащенко¹*

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

**A CONTROLLED DOPING OF NANOSIZED SEMICONDUCTOR
FILMS DURING ION-BEAM CRYSTALLIZATION**

**A.S. Pashchenko¹*

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

The method of doping during the growth of thin films by ion beam crystallization is proposed. The possibility of control the doping of semiconductors during ion-beam crystallization, for example Si and Sb, is shown. It is found that increasing the temperature of the evaporator is more than 200°C leads to the accumulation of impurities in the growth direction of the layer. The silicon layers doped with antimony to a concentration of 10^{18}cm^{-3} were grown.

Актуальной проблемой для наногетероструктур является получение заданных профилей легирования и требуемых уровней концентрации носителей заряда в каждом слое наноструктуры [1]. Целью настоящей работы является разработка способа легирования в процессе роста тонких пленок кремния ионно-лучевой кристаллизацией (ИЛК) и исследование профилей распределения сурьмы в кремнии.

При разработке способа легирования в условиях ИЛК [2–5] важной задачей является разделение потоков примеси и основного вещества. Такой подход позволит повысить контроль процесса легирования во время роста наноструктур. За основу нами взят метод легирования из твердотельного источника. Твердотельный источник сурьмы использован в качестве легирующей примеси. Калибровка потока паров Sb проведена в диапазоне температур 100÷400°C. Соответствующая температурная зависимость приведена на рис. 1.

В эксперименте по легированию слоев Si температура испарителя варьировалась в интервале 150–300°C. Выбор температурного диапазона сделан с целью баланса скоростей ростовых компонентов, чтобы поток сурьмы не превышал потока кремния.

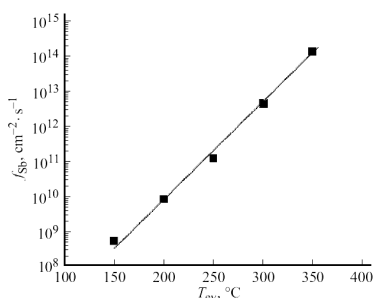


Рис. 1. Результаты калибровки твердотельного источника по температуре

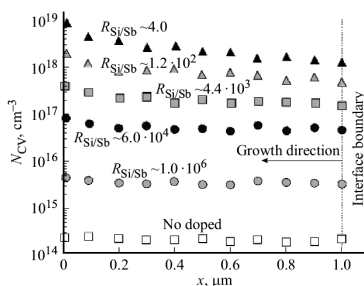


Рис. 2. Профили концентрации Sb в Si при различных температурах испарителя

ИЛК Si проводилась при температуре 550°C со скоростью осаждения 0.35 ML/s. Профили концентрации Sb измерялись методом вольт-фарадных характеристик ртутным зондом MDC-802B.

На рис. 2 приведены результаты легирования Si сурьмой в процессе ИЛК. Для определения степени легирования сурьмой процесс осуществлялся при отношении потоков кремния и примеси $R_{\text{Si/Sb}}$ в диапазоне 10^6-10^1 .

В заключении отметим, что нами разработан способ управляемого легирования из твердотельного источника в процессе ИЛК. Максимальная концентрация легирования составила 10^{18}cm^{-3} . Установлено, что уменьшение величины $R_{\text{Si/Sb}}$ сопровождается образованием избытка Sb на поверхности растущего слоя, что приводит к неравномерным профилям легирования. Однако эффект проявляется слабо, так как колебания концентрации носителей заряда происходят в пределах одного порядка величины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-01052 и 16-38-00575.

Литература

1. Seshan K. Handbook of thin film deposition. William Andrew, 408 p. (2012).
2. Л.С. Лунин, С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко, Л.Н. Болобанова, Неорганические материалы. 2012. Т. 48. В. 5. С. 517-522.
3. Л.С. Лунин, С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко, Неорганические материалы. 2013. Т. 49. №5. С. 457.
4. С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко, Л.С. Лунин, В.А. Ирха, Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39. № 16. С. 30-37.
5. С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко, А. Williamson, Л.С. Лунин, В.А. Ирха, В.А.Гамидов, Письма в ЖТФ, 2015, Т. 41, Вып. 13, С. 102-110.

**НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ТЕМПЛЕТНО-БУФЕРНЫЕ СЛОИ
НА ОСНОВЕ МАТРИЦ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
ДЛЯ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА ПЛЕНОК НИТРИДА ГАЛЛИЯ**

**Г.Г. Горох¹, В.И. Осинский², А.А. Лозовенко¹*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники БГУИР,
Беларусь, 220013, Минск, П. Бровки, д. 6, e-mail: gorokh@bsuir.by

²ГП «НИИ микроприборов» НТК «Институт Монокристаллов» НАН Украины,
Украина, Киев, ул. Пивнично-Сирецька, 3. e-mail: osinsky@imd.org.ua

**NANOSTRUCTURED TEMPLATE-BUFFER LAYERS BASED
ON NANOPOROUS ANODIC ALUMINA MATRIXES FOR EPITAXIAL GROWTH
OF GaN FILMS**

**G.G. Gorokh¹, V.I. Osinsky², A.A. Lozovenko¹*

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

²State Enterprise Research Institute of Microdevices
STS «Institute For Single Crystals» of NAS of the Ukraine,
Kiev, Pivnichna-Syretska str., 3, e-mail: osinsky@imd.org.ua

A method of formation of nanostructured template-buffer layers on the silicon substrates based on ultra-thin nanoporous anodic alumina matrixes with III-nitride nanostructures for epitaxial growth of low defect GaN layers has been developed. It consists of a sequence of several operations - forming of anodic alumina matrix without barrier layer on the wafer surface, filling of the AOA pores by nitride nanoparticles, surface planarization and epitaxial growth of GaN film on the smooth surface. The local and selective epitaxial growth of III-nitride nanostructures in anodic alumina pores of size less than 50 nm allows obtaining of the GaN nanolayers characterized monocrystallinity with low dislocation density.

Нитрид галлия, как и другие соединения группы A^3B^5 , является одним из основных материалов для светоизлучающих устройств ультрафиолетового спектрального диапазона и высокочастотных мощных приборов. Цель настоящей работы состояла в создании на кремниевых подложках наноструктурированных темплетно-буферных систем, состоящих из модифицированной матрицы анодного оксида алюминия (АОА) с синтезированными в порах три-нитридными наноструктурами.

В результате проведенных исследований разработана технология формирования темплетно-буферных слоев на кремниевых пластинах для минимизации дефектов в выращиваемых на них эпитаксиальных слоях, последовательность технологических операций, формирования которых

схематично показана на рис. 1. Сначала на поверхности кремниевой пластины методом двухстадийного электрохимического анодирования напыленного в вакууме слоя алюминия создавали нанопористую матрицу из модифицированного слоя АОА заданной толщины с размерами пор менее 50 нм и удаленным барьерным слоем [1]. Затем методом гидридной газофазной эпитаксии в порах АОА осуществляли селективный эпитаксиальный рост нитрида галлия, предварительно формируя низкотемпературный буферный слой, на котором выращивали высокотемпературный нитрид галлия. После формирования наноструктур GaN в порах АОА с его поверхности удаляли внешний слой GaN методом ПХТ, и проводили повторный синтез нитрида галлия на сглаженной поверхности. Низкая размерность наноструктур и использование низкотемпературного буферного слоя GaN позволило минимизировать плотность структурных дефектов в наших образцах. Рентгеноструктурный анализ показал что, наноструктуры GaN в порах АОА являются монокристаллическими с неполярной а-ориентацией, на дифрактограммах обнаружен единственный рефлекс при $2\theta = 57,77^\circ$, что очень близко к рефлексу от кристаллографических плоскостей. Полуширина двукристаллической рентгеновской линии составила ~ 450 arcsec, что свидетельствует об относительно низкой плотности дефектов кристаллической структуры и связанных с ними дислокаций [2]. Такая темплетно-буферная система способна обеспечить согласование решето

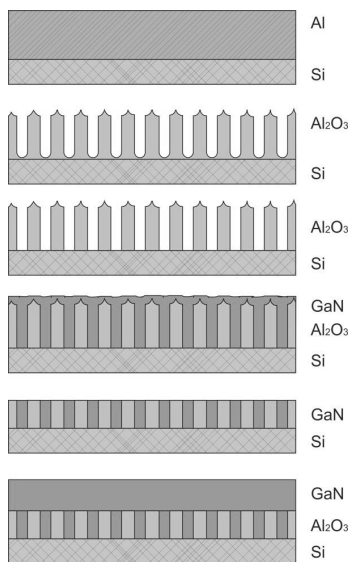


Рис. 1. Последовательность технологических операций формирования темплетно-буферных слоев на основе АОА на поверхности кремниевых пластин

к и способствует формированию низкодефектных эпитаксиальных слоев на кремниевых подложках для создания на них монокристаллических интегральных схем нового поколения.

Литература

1. G. Gorokh et al., Proc. of «Microwave & Telecommunication Technology» 2 789 (2010).
2. G.G. Gorokh et al., Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies 9 (4) 913 (2011).

**ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРА ПОРИСТЫХ
БУФЕРНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ ДЛЯ ГЕТЕРОЭПИТАКСИИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ**

**А.Л. Долгий, В.П. Бондаренко*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6,
e-mail: dolgyi@gmail.com

**FORMATION AND STRUCTURE OF POROUS BUFFER SILICON LAYERS
FOR HETEROEPITAXY OF SEMICONDUCTOR
FILMS ON SILICON SUBSTRATES**

**A.L. Dolgyi, V.P. Bondarenko*

Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics
Republic of Belarus, 220013 Minsk, P. Brovki str. 6, e-mail: dolgyi@gmail.com

In the present work, formation and structure of porous silicon (PS) are investigated to use PS layers as buffer layers for fabricating heteroepitaxial films of compound semiconductors on silicon wafers. Thickness and porosity of PS layers as macroscopic parameters and pore diameters and number of pores as microscopic parameters are presented depending on different formation regimes of PS. Chemical cleaning of PS is discussed to prevent «pollution» of epitaxial films grown on PS buffer layers.

Настоящая работа посвящена изучению процессов формирования и структуры слоев пористого кремния (ПК) для их использования в качестве буферных слоев для гетероэпитаксии полупроводниковых пленок на кремниевых подложках. Благоприятное влияние буферных слоев ПК было продемонстрировано нами для гетероэпитаксии на кремнии алмазных пленок, пленок арсенида галлия, сульфида свинца, теллурида свинца и других полупроводниковых материалов [1].

Слои ПК формировали методом анодирования в растворах HF. Основными параметрами ПК являются толщина и пористость, характеризующая объемную плотность материала. К этим параметрам, при использовании ПК как буферного слоя, предъявляются достаточно жесткие требования по однородности в пределах площади анодируемых кремниевых подложек и по их воспроизводимости от пластины к пластине. Очень важно для ПК минимизировать его загрязнение электролитом и продуктами растворения кремния в результате анодирования. Установлено, что в зависимости от режимов анодирования на монокристаллах кремния с разным уровнем легирования и типом проводимости можно получать ПК

с диаметрами каналов пор от единиц нанометров до нескольких сотен нанометров.

На рис. 1 представлена зависимость объемной плотности ПК (пористости) от плотности тока для образцов ПК, полученных на сильнолегированных кремниевых пластинах электронного типа проводимости марки КЭС-0.01 (100) при их анодировании в 12% водном растворе HF [2]. Для данного типа кремния и электролита возможно формирование ПК с объемной плотностью от 0,4 до 2,1 г/см³. Пористость полученных слоев ПК изменяется от 10% до 80%.

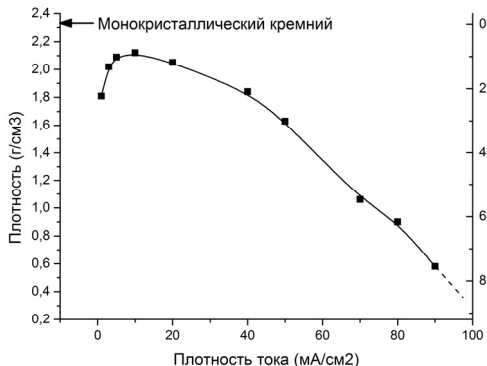


Рис. 1. Зависимость объемной плотности и пористости ПК от плотности анодного тока

Буферные слои ПК могут быть однослойными или многослойными, состоящими из нескольких слоев ПК с различной пористостью и толщиной. Хорошие результаты по эпитаксии получены для двухслойной буферной структуры, состоящей из верхнего тонкого слоя ПК с пористостью менее 30% и второго толстого слоя ПК с высокой пористостью более 55%. Верхний низкопористый слой обеспечивает высокое структурное совершенство эпитаксиального слоя, а нижний высокопористый слой позволяет снизить механические напряжения, вызванные различием параметров решеток и термомеханических свойств эпитаксиальной пленки и кремниевой подложки. В докладе представлены также результаты анализа химического состава ПК после его формирования и химических обработок в различных растворах.

Литература

1. Н.И. Каргин и др., Материалы электронной техники. Известия Вузов. №4, 4 (2013).
2. E. Chubenko et al., in: G. Korotcenkov (Ed.) Porous Silicon. Vol.3. Taylor & Francis Group, 141 (2016).

**РЕГУЛЯРНЫЕ МАТРИЦЫ Al_2O_3 С НАНОПРОВОДАМИ InSb
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

**А.А. Лозовенко¹, Г.Г. Горох¹, И.А. Обухов², Е.А. Смирнова²*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, БГУИР,
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: gorokh@bsuir.by
²НПП «Системные ресурсы», Россия, 142717, Московская обл.,
Ленинский р-н, Мильково, вл. 1, e-mail: i_obukhov@systemres.ru

**REGULAR Al_2O_3 MATRIX WITH InSb NANOWIRES
FOR PERSPECTIVE NANO-ELECTRONIC DEVICES**

**А.А. Lozovenko¹, G.G. Gorokh¹, I.A. Obukhov², E.A. Smirnova²*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, BSUIR
Belarus, 220013 Minsk, Brovki Str. 6, e-mail: gorokh@bsuir.by
²System Recourses Ltd., Russia, 142717, Moscow region,
Leninsky district, Milkovo 1, e-mail: i_obukhov@systemres.ru

Method of porous alumina templates formation for the synthesis of InSb nanowire arrays has been developed. InSb nanowires were synthesized by electrochemical deposition from aqueous solutions into porous alumina templates. The morphology of the nanostructures was investigated by scanning electron microscopy. The indium antimonide composition was study with X-ray microanalysis. The measured I-V characteristics of InSb nanowires had a non-linear view, and maximum current values through the nanowire arrays have reached to 129,8 A/cm² at a voltage of about 3 V.

Антимонид индия обладает уникальными электрофизическими свойствами, в том числе, минимальной длиной размерного квантования, что позволяет использовать его для создания устройств нанoeлектроники, работающих на квантовых эффектах. В этой связи особую актуальность приобретает разработка новых технологий и методик создания наноструктур InSb с размерами, меньшими длины его размерного квантования [1]. В работе представлены результаты разработки методов формирования массивов нанопроводов InSb в матрицах анодного оксида алюминия и исследований их структурных и электрофизических характеристик.

Матрицы для формирования массивов нанопроводов, представляющие собой нанопористые проницаемые мембраны, металлизированные медью с одной стороны, были приготовлены методом анодирования алюминиевой фольги в 0,4 М растворе щавелевой кислоты при напряжении 40 В. Электрохимическое осаждение нанопроводов InSb осуществляли из водного раствора состава 0,14 М SbCl₃, 0,11 М InCl₃, 0,36 М C₆H₈O₇

и 0,17 М $K_3C_6H_5O_7$, с $pH = 2,0$ [2]. Осаждение проводилось в гальваностатическом режиме при плотности тока 24 mA/cm^2 , до полного заполнения пор.

Электронно-микроскопические исследования образцов показали, что в результате электрохимического осаждения в каждой поре образовались нанонити InSb с диаметрами, соответствующими диаметрам пор и равными 40 нм. Проведен рентгеноспектральный микроанализ образцов и определен состав непосредственно исследуемых нанопроводов в нанопористой матрице анодного оксида алюминия. В результате машинной обработки полученных данных количественно рассчитано процентное соотношение индия и сурьмы в составе осажденных нанопроводов. Весовое соотношение InSb составляет 36,89% индия и 63,11% сурьмы.

Для исследования вольт-амперных характеристик, на верхней стороне матрицы были созданы медные контакты $1 \times 1 \text{ мм}$, при этом каждый контакт объединял примерно $1,109 \cdot 10^8$ нанопроводов. Проведенные вольт-амперные исследования изготовленных структур с нанопроводами InSb диаметром 40 нм в матрице анодного оксида алюминия толщиной 40 мкм показали, что измеренные характеристики в диапазоне $0 \div 3 \text{ В}$ при прямом и обратном включении имеют экспоненциальный характер, с максимальным током протекающим через контакт около 320 мА, что соответствует плотности тока $129,8 \text{ A/cm}^2$ через сечения всех нанопроводов. При этом коллекторный контакт за 150 с разогревался до 73°C , а при обратном включении температура эмиттерного контакта достигала 55°C .

Таким образом, экспериментальные результаты подтвердили теоретические предпосылки о сильном влиянии контактных явлений на электрические характеристики массивов квантовых проводов, которые могут быть использованы при создании термоэлектрических устройств. Охлаждающие устройства на основе подобных систем квантовых проводов позволяют управлять тепловым режимом электрических схем, приложенным напряжением и могут найти широкое применение в технике, в частности, для охлаждения интегральных схем (процессоров).

Литература

1. Горох, Г. Г., И. А. Обухов, А. А. Лозовенко, Технология и конструирование в электронной аппаратуре 1 3 (2015).
2. Gorokh G. et al., Proc. of "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013) 2 820 (2013).

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТРИЧНЫХ TiO_2/Bi_2O_3 НАНОСТРУКТУР

**А.И. Захлебаева¹, Г.Г. Горох¹, В.В. Жилинский², Н.В. Богомазова²*

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

²Белорусский государственный технологический университет Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, дом 13а, e-mail: zhilinski@yandex.ru

FORMATION AND STUDY OF MATRIX TiO_2/Bi_2O_3 NANOSTRUCTURES

**A.I. Zakhlebaeva¹, G.G. Gorokh¹, V.V. Zhyliniski², N.V. Bogomazova²*

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

²Belarusian State Technological University Belarus, 220006, Minsk, Sverdlova str., 13a, e-mail: zhilinski@yandex.ru

Nanoscale periodical column-like titanium oxide was formed by anodizing a bilayer composition Ti/Al in the oxalic acid solution with followed vacuum annealing. The microstructure and composition of formed anodic titania have been investigated. The titanium oxide nanostructures were composed of nanoscale quasi-amorphous titania phases of anatase and rutile with minimal inclusions Ti_2O_3 and TiO. Vacuum annealing reduces the content ratio of TiO_2 and increases the quantity inclusions of Ti_2O_3 and TiO. Heterostructures $p-Si/n-TiO_2/p-Bi_2O_3$ were formed on matrix of titanium oxide by chemical deposition. Heterostructures were characterized by step-like heterotransition and can be used in new generation of LED arrays.

Островково-сетчатые матрицы анодного оксида титана (АОТ) формировали электрохимическим анодированием тонкопленочной системы Ti/Al (100 и 1000 нм), напыленной на Si подложку в 0,6 М растворе щавелевой кислоты при напряжении 50 В. После анодирования с поверхности образцов селективно удаляли сформированный анодный оксид алюминия (АОА) в водном растворе ортофосфорной кислоты и хромового ангидрида при $T=60^{\circ}C$, после чего проводили вакуумный отжиг АОТ матриц при $T=430^{\circ}C$ и остаточном давлении $(2-5) \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. в течение 90 минут.

Электронно-микроскопические исследования сформированных структур показали, что формирование АОТ происходит в виде наноразмерных локальных столбиков, количество и местоположение которых определяется числом пор и расположением оснований оксидных ячеек АОА на поверхности пленки титана, а форма и геометрические размеры в

значительной степени зависят от природы электролита и величины анодного напряжения [1]. В результате исследования состава сформированных столбиков АОТ установлено, что неотожженные матрицы преимущественно состоят из квазиаморфного TiO_2 со структурой рутила и анатаза, что характеризуется наличием на ИК-спектре полос поглощения с $\nu_{\max} = 610 \text{ см}^{-1}$, 525 см^{-1} и $\approx 350 \text{ см}^{-1}$. Также матрицы АОТ включают оксидные модификации титана Ti_2O_3 и TiO , чему соответствуют полосы поглощения с $\nu_{\max} = 1020 \text{ см}^{-1}$, 650 см^{-1} и $\approx 410 \text{ см}^{-1}$. В спектре отражения отожженных структур наблюдается снижение интенсивности и размытие полос поглощения с $\nu_{\max} = 650 \text{ см}^{-1}$, 525 см^{-1} , 425 см^{-1} и $\approx 350 \text{ см}^{-1}$. Отчетливо проявляется полоса $\approx 410 \text{ см}^{-1}$, а также появляются две дополнительных полосы поглощения с $\nu_{\max} = 535 \text{ см}^{-1}$ и 515 см^{-1} , что свидетельствует о валентных колебаниях Ti-O в ромбоэдрической структуре Ti_2O_3 и в структуре монооксида TiO , а также об увеличении разупорядоченности кристаллической структуры и аморфизации структуры оксидов в результате отжига [2]. Таким образом, вакуумный отжиг матриц АОТ приводит к уменьшению относительного содержания TiO_2 и росту доли включений Ti_2O_3 и TiO в структуре столбиков.

На отожженных матрицах АОТ формировали гетероструктуры $p\text{-Si}/n\text{-TiO}_2/p\text{-Bi}_2\text{O}_3$ путем нанесения на поверхность оксида титана 0,3 мл 5% раствора нитрата висмута (III) с последующей выдержкой в 1 М КОН. Полученные структуры сушили при комнатной температуре в течение 1–2 часов, после чего отжигали в атмосфере воздуха при $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение двух часов. Для синтезированных структур характерно наличие ступенчатых гетеропереходов $p\text{-Si}/n\text{-TiO}_2$ и $n\text{-TiO}_2/p\text{-Bi}_2\text{O}_3$, что обусловлено дефектной кристаллической структурой островково-сетчатого TiO_2 , сформированного с использованием матриц АОА. Структуры с множественными гетеропереходами обладают рядом перспективных функциональных свойств, таких как хемочувствительность в отношении токсичных газов, высокая стойкость в качестве анодного покрытия для литий-ионных аккумуляторов, повышенная генерационная способность и стабильность в солнечных элементах, селективная фотокаталитическая активность, фотостимулированные электронно-дырочные разделения, и могут быть использованы при создании нового поколения светодиодных матриц и устройств опто- и микроэлектроники.

Литература

1. V.C. Gudla et al., App. Surf. Sci. **324**, 554 (2015).
2. V. Shymanovska et al., J. Nano- Electron. Phys. **3(2)**, 63 (2011).

**ВЛИЯНИЕ ТИПА И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРИТЕЛЯ МЕДИ
НА ДЕФЕКТНОСТЬ ГРАФЕНА ПРИ ПЕРЕНОСЕ С ПОВЕРХНОСТИ
КАТАЛИЗАТОРА НА ЦЕЛЕВУЮ ПОДЛОЖКУ**

**Д.А. Мосин¹, Н.Г. Ковальчук¹, А. Lazauskas², В.А. Лабунюв¹, S. Tamulevičius²,
С.Л. Прищеп¹, И.В. Комиссаров¹*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, дом 6, e-mail: intellect1995@mail.ru,
komissarov@bsuir.by

²Каунасский технологический университет,
Литва, 111950581, г. Каунас, улица К. Baršausko, дом 59

**THE INFLUENCE OF COPPER SOLVENT TYPE AND ITS CONCENTRATION
ON DEFECTIVENESS OF GRAPHENE FILM TRANSFERRED FROM CATALYST
ON TARGET SUBSTRATE**

**D.A. Mosin¹, N.G. Kovalchuk¹, A. Lazauskas², V.A. Labunov¹, S. Tamulevičius²,
S.L. Prischepa¹, I.V. Koimssarov¹*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Republic of Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka str. 6,
e-mail: intellect1995@mail.ru, komissarov@bsuir.by

²Institute of Materials Science, Kaunas University of Technology, K. Baršausko str. 59,
Kaunas 51423 Lithuania

In this work was studied the influence of type and concentration solvent of copper on defectiveness of graphene at the transfer from the catalyst surface to the target substrate. It was found that defects of the structure of graphene with the concentration of the etchant $\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (1:1) was more than with the concentration of the etchant $\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (1:3). Defects of the structure of graphene depend on chemical content of the etchant. Defectiveness of graphene with the etchant Cr_2O_3 is much more than with the etchant FeCl_3 .

В этой работе исследуется влияние типа травителя меди, а также его концентрации на дефектность графена, синтезированного методом ХПО, переносимого без использования полимерной основы с поверхности медного катализатора на целевую подложку. Сравнительный анализ морфологии пленок графена перенесенных на подложку SiO_2 с использованием растворов FeCl_3 ($\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (1:3)) и Cr_2O_3 ($\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (1:2)) показал, что пленка, перенесенная с использованием травителя на основе Cr_2O_3 обладает большей шероховатостью (см. линию профиля поверхности на рис. 1), более того, интенсивность линий 2D рамановских спектров этой пленки значительно ниже, а интенсивность D значительно

выше, чем для перенесенной с использованием травителя на основе FeCl_3 .

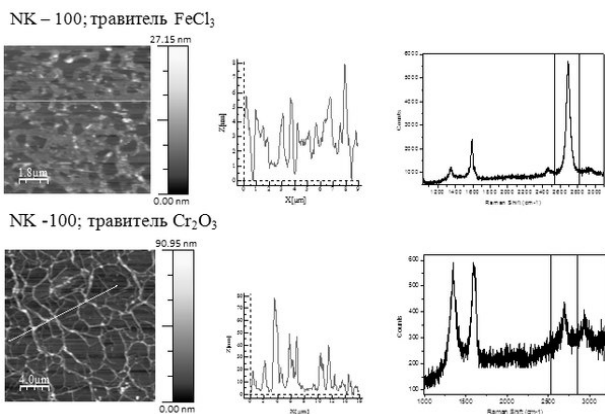


Рис.1. Морфология, выбранная линия профиля поверхности, а также типичный спектр комбинационного рассеяния света для пленок графена перенесенных на целевую подложку с использованием травителей меди на основе FeCl_3 и Cr_2O_3

Выявлено, что дефектность пленки также является функцией концентрации травителя меди. Анализ спектров комбинационного рассеяния света пленок перенесенных с использованием травителя на основе хлорного железа показал, что значение положения максимума профиля распределения интенсивности пика D к пику G смещается в сторону больших значений при увеличении концентрации FeCl_3 (рис. 2).

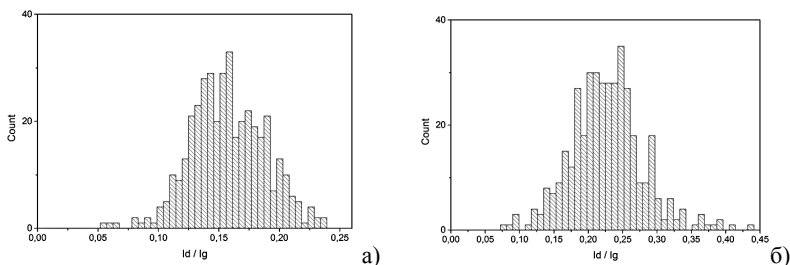


Рис. 2. Профиль распределения отношения интенсивности пика D к пику G (для травителя на основе FeCl_3 с концентрацией а) (1:3) и б) (1:1)

**ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ГРАФЕНА СИНТЕЗИРОВАННОГО
НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДНОГО КАТАЛИЗАТОРА МЕТОДОМ ХПО
ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ ОТ ВРЕМЕНИ СИНТЕЗА**

**А.В. Фельшерук, Н.Г. Ковальчук, В.А. Лабунув, С.Л. Прищепка,
И.В. Комиссаров*

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

**DEPENDENCE OF GRAPHENE STRUCTURE PARAMETERS SYNTHESIZED
ON THE SURFACE OF A COPPER CATALYST
BY CVD METHOD AT ATMOSPHERIC PRESSURE FROM
THE TIME OF SYNTHESIS.**

**A.V. Felsheruk, N.G. Kovalchuk, V.A. Labunov, S.L. Prischepa, I.V. Komissarov*

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

In our experiment we grew graphene by atmospheric pressure CVD. Decane was used as carbon source, and copper foil with 60 microns thickness was utilized as a catalyst substrate. The experiments were performed at different exposure times (10 and 30 min.) of the samples. The synthesized films transferred on SiO₂ surface were analyzed by Raman spectroscopy technique. Based on the obtained data we conclude that time crucial for graphene monolayer formation is less than 10 min in our experiment.

В работе представлены результаты исследования методами спектроскопии комбинационного рассеяния света зависимости структуры образцов графена, выращенных методом CVD при атмосферном давлении, от времени синтеза. Синтез образцов проводился в парах декана с расходом 3 мкл/мин, при следующих расходах газов: водород 150 см³/мин, азот 160 см³/мин. Температура синтеза 1050°C. Время синтеза графена 10 и 30 минут. На перенесенных на поверхность оксида кремния пленках графена, производилось рамановское картирование случайного участка размером 20x20 мкм², с шагом 1 мкм. На рис. 1 представлены гистограммы распределения позиций пиков G и 2D, а также соотношение их интенсивностей для исследованных образцов, полученные по результатам рамановского картирования. Для образца со временем синтеза 30 мин все представленные распределения являются немонотонными и хорошо описываются двумя функциями распределения Гаусса (сплошные линии на

рис. 1). Положения пиков G и 2D, а также соотношение их интенсивностей позволяют говорить о наличии в исследуемой пленке двух фракций с толщиной $1\div 2$ и $2\div 3$ монослоя графена, соответственно. Для образца со временем синтеза 10 мин, полученные данные хорошо аппроксимируются распределением Гаусса. Представленные данные положений пиков и их соотношения позволяют оценить толщину исследуемой пленки в $2\div 3$ монослоя графена.

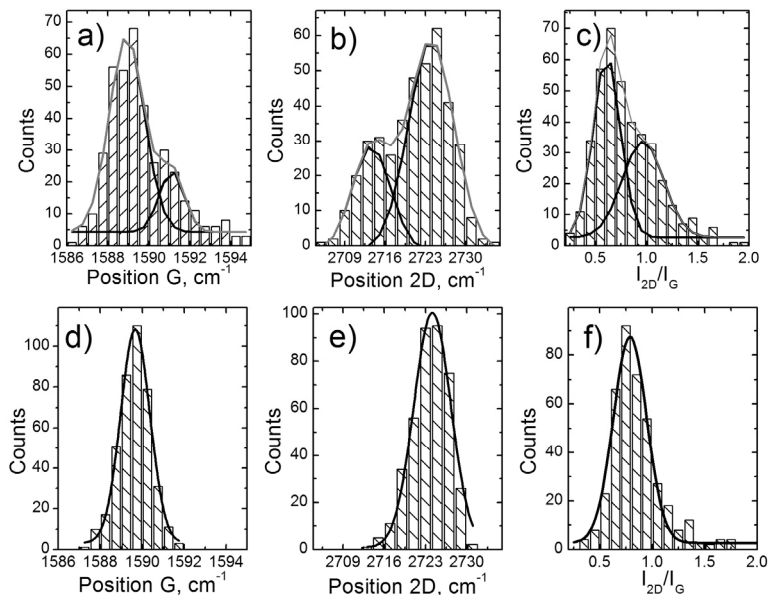


Рис. 1. Гистограммы распределения позиций пиков 2D и G, а также их отношения для образца со временем синтеза 30 минут a, b, c) и 10 минут d, e, f)

Полученная, непропорциональная времени, зависимость толщины образца (количество слоев) может быть обусловлена как масштабом однородности образцов, превышающей размер сканирования (>20 мкм). Так и с особенностями процесса ХПО при атмосферном давлении. Кроме этого, полученные данные позволяют заключить, что характерное время формирования первого слоя графена в исследуемом процессе составляет менее 10 минут.

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО
РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПОДВЕШЕННОГО ГРАФЕНА СИНТЕЗИРОВАННОГО
МЕТОДОМ ХПО**

**К.А. Нигериш¹, Н.Г. Ковальчук¹, В.А. Лабунюв¹, А.В. Бондаренко¹,
С.А. Шостаченко², Р.В. Рыжук², Н.И. Каргин², И.В. Комиссаров¹*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, дом 6,
e-mail: nigerish95@mail.ru, komissarov@bsuir.by

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

**STATISTICAL DATA OF RAMAN SPECTRA LINES
OF THE SUSPENDED GRAPHENE SYNTHESIZED BY CVD**

**K.A. Nigerish¹, N.G. Kovalchuk¹, V.A. Labunov¹, H.V. Bandarenka¹, S.A. Shostachenko², R.V.
Ryzhuk², N.I. Kargin², I.V. Komissarov¹*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Republic of Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka str. 6,
e-mail: nigerish95@mail.ru, komissarov@bsuir.by

²National Research Nuclear University «МЕРФИ»
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe highway 31

Suspended graphene film synthesized by CVD at atmospheric pressure was investigated by Raman scattering. In our experiment the laser beam of various powers was focused on the middle of the suspended graphene film, causing heating of the central site of a sample. According to the obtained data statistical charts distribution of parameters of peaks of graphene are constructed and their analysis is carried out. When using the laser with a power of 0.57–5 mW range we observed shift of graphene Raman peaks. The slope for G band position was found $\sim -2.79 \text{ cm}^{-1}\text{mW}^{-1}$.

Вследствие большой удельной теплопроводности (до $5000 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) графен рассматривается как перспективный материал для элементов отвода тепла в устройствах СВЧ электроники. Измерение теплопроводности в этом двумерном материале представляет собой довольно сложную задачу. Зависимость положения характерных линий спектров комбинационного рассеяния света (КРС) графена от температуры позволяет использовать методы КРС для измерения теплопроводности. В этой работе мы исследовали статистические параметры линий спектров комбинационного рассеяния света подвешенного графена (рис. 1а), записанных при различных мощностях излучения лазера (рис. 1б).

Синтез графена проводился методом ХПО при атмосферном давлении. Затем пленка была перенесена на медную сетку, содержащую сквозные отверстия диаметром 100 мкм. Образец был исследован на 3D рамановском конфокальном микроскопе Confofoc NR500, при следующих условиях: длина волны лазерного излучения 473 нм, диаметр пучка ~ 500 нм, диапазон исследования $1100\div 2900$ cm^{-1} , время интегрирования 5 с. Для исследования был выбран участок размером 20×20 мкм в центре подвешенной пленки.

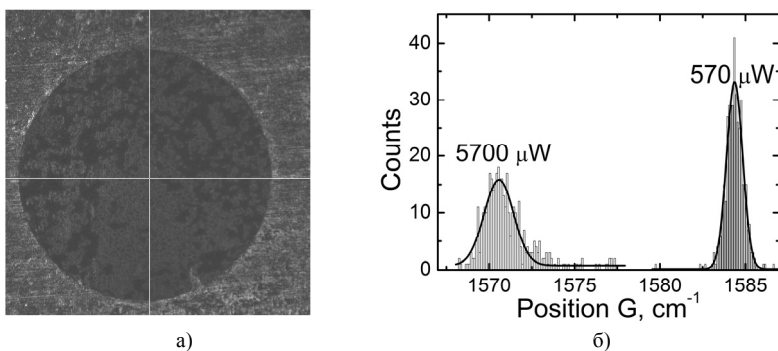


Рис. 1. Рэлеевское изображение сквозного отверстия в меди покрытого графеном а); гистограммы распределения позиций линии G спектров КРС записанных при различных мощностях возбуждающего лазера б)

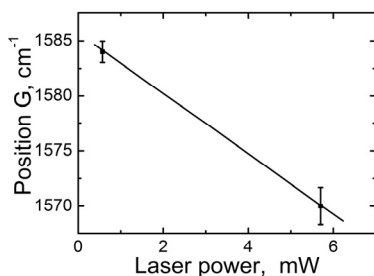


Рис. 2. Зависимость позиции G линии от мощности излучения лазера (на осн. данных рис.1б)

Коэффициент смещения позиции линии G в зависимости от мощности возбуждающего лазера составил -2.79 $\text{cm}^{-1}\text{mW}^{-1}$ (рис. 2). Полученная величина ~ 2 выше приведенной в литературе, что, по-видимому, связано с меньшей теплоемкостью исследованного графена, по сравнению с графеном полученным механическим расщеплением, обусловленного его неоднородностью.

**СИНТЕЗ ДВУХСЛОЙНОГО ГРАФЕНА С НАРУШЕННОЙ
АВ УПАКОВКОЙ МЕТОДОМ ХПО ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**

**Н.Г. Ковальчук¹, И.В. Комиссаров¹, В.А. Лабунюв¹, К.В. Гирел¹, О.В. Королик²,
М.С. Тиванов², А. Lazauskas³, S. Tamulevičius³, V. Grigaliūnas³, Š. Meškiniš³,
T. Tamulevičius³, С.Л. Прищепа¹*

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

²Белорусский государственный университет,
Беларусь, 220030, г. Минск, ул. Независимости 4

³Каунасский технологический университет,
Литва, 111950581, г. Каунас, улица К. Baršausko, дом 59

**SYNTHESIS OF BILAYER GRAPHENE WITH NON-AB STAKING
BY CVD AT ATMOSPHERIC PRESSURE**

**N.G. Kovalchuk¹, I.V. Komissarov¹, V.A. Labunov¹, K.V. Girel¹, O.V. Korolik²,
M.S. Tivanov², A. Lazauskas³, M. Andrulevičius³, T. Tamulevičius³, V. Grigaliūnas³, Š.
Meškiniš³, S. Tamulevičius³, S.L. Prischepa¹*

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

²Belarusian State University, Republic of Belarus, 220030 Minsk Nezavisimosti av. 4,

³Institute of Materials Science, Kaunas University of Technology,
K. Baršausko str. 59, Kaunas 51423 Lithuania

We have present Raman studies of graphene films grown on copper foil by atmospheric pressure CVD using decane as a precursor and mixture of nitrogen and hydrogen as a carrier gas. We have applied specially developed statistical analysis approach to Raman data evaluation. It was found that in particular cases Raman spectra can be successfully assigned to fractions of the films with different thicknesses using different parameters such, as full width at half maximum and position of the 2D band of graphene. The presence of G-band resonance revealed the twisted nature of bilayer graphene.

Двухслойный графен, в котором АВ упаковка нарушена (twisted graphene, TG), является интересным объектом как с точки зрения фундаментальных, так и прикладных аспектов. Одним из уникальных свойств такого графена является зависимость его электронных свойств (например, скорость на поверхности Ферми) от угла взаимного поворота слоев в плоскости (rotation angle, RA). В силу резонансного характера спектров комбинационного рассеяния света (КРС) в графене, положение, интенсивность и полуширина характерных полос спектра (G и 2D), являются функцией RA.

В этой работе показано, что при определенных параметрах синтеза графена методом ХПО на медной фольге из паров декана с использованием смеси H_2 и N_2 в качестве газа носителя, возможен рост пленки содержащей фракцию двухслойного графена. На основе анализа распределений значений параметров характерных линий спектров показано, что выращенная пленка преимущественно содержит две фракции соответствующие SLG и двухслойному графену (рис. 1).

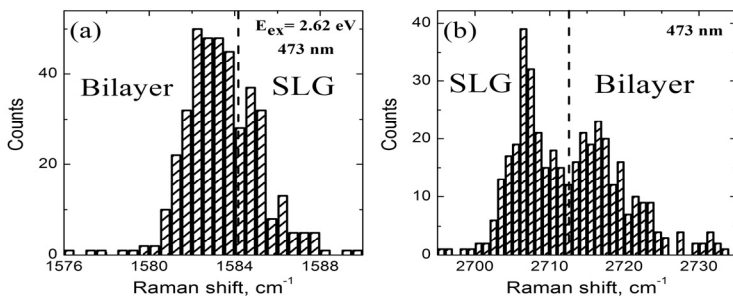


Рис. 1. Гистограммы распределения значений (а) положения G пика и (б) положения 2D пика спектров КРС полученных из картирования пленки графена на подложке SiO_2/Si

Более того установлено, что двухслойный графен является TG. Это подтверждается наличием спектров с более интенсивной 2D полосой и ее голубым сдвигом по отношению к SLG, а так же наличием G - резонанса, связанного с формированием особенностей ван Хофа, для различных волн возбуждения (рис.2).

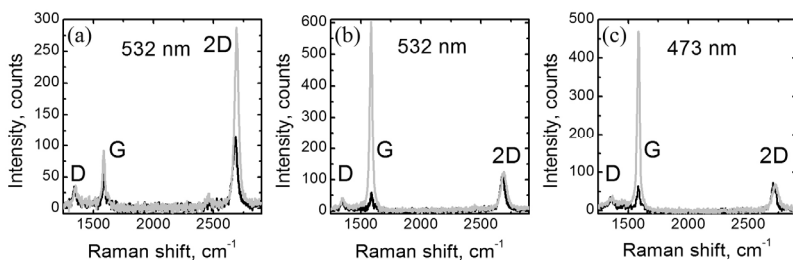


Рис. 2. Спектры КРС образца на подложке SiO_2/Si . (а) спектры SLG (черный) и двухслойного графена (серый). (б) спектры для SLG (черный) и двухслойного графена с G- резонансом (серый) (с) спектры для SLG (черный) и двухслойного графена с G-резонансом (серый)

**КЛАСТЕРНЫЕ ИОННЫЕ ПУЧКИ КАК НОВЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ
СВЕРХГЛАДКИХ ПОДЛОЖЕК В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ЭЛЕМЕНТОВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

**И.А. Матющенко, М.М. Калошин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Институт функциональной ядерной электроники,
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: matushenko.ilya@gmail.com

**CLUSTER ION BEAMS AS A NEW METHOD OF OBTAINING
ULTRA-SMOOTH SUBSTRATES IN THE NANOELECTRONICS FABRICATION
TECHNOLOGY**

**I.A. Matiushchenko, M.M. Kaloshin*

National Research Nuclear University «MEPhI» Institute of functional nuclear electronics
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: matushenko.ilya@gmail.com

Gas cluster ion beams (GCIB) is a new and emerging beam technology aimed on nano-level surface modification of virtually all materials, including extra-hard, such as diamond, SiC and Al₂O₃. One of important application is surface planarization down to average roughness of few angstroms, which is crucial for nanostructure fabrication. Such surface roughness is not achievable by using traditional methods such as chemical-mechanical planarization or not suitable by time and resources consuming. The clusters can be considered as a “bridge” between atoms and solids and have various applications.

Нерешенной проблемой в технологии производства элементов нанoeлектроники является получение подложек с малой шероховатостью (единицы ангстрем), и малой глубиной нарушенного слоя. Традиционно для этого используется химико-механическая полировка. Однако этот метод является весьма трудоемким для планаризации особо твердых материалов, таких как алмаз, SiC, Al₂O₃.

В связи с этим, предлагается использовать кластерно-ионную технологию для этой и других задач модифицирования поверхности.

Происходящие при этом процессы характеризуются малым нарушением поверхности и структуры мишени и явлением латерального распыления.

Кластер – это агломерат атомарных или молекулярных частиц, от единиц до десятков тысяч. В случае газовых кластеров частицы удерживаются вместе Ван-дер-Ваальсовскими силами, энергия которых составляет порядка 10 мэВ. При ударе кластера о поверхность одновременно взаимодействует большое количество атомов.

Кластерные ионные пучки получают при сверхзвуковом истечении газа через сопло особой конфигурации (сопло Лавала). Сверхзвуковой поток частиц, выходя в вакуумную камеру, адиабатически охлаждается и конденсируется в кластеры. Принципиальная схема установки изображена на рис. 1.

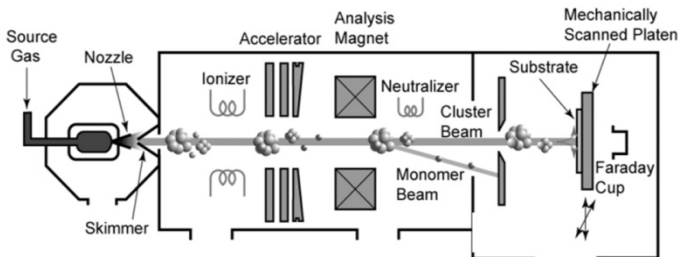


Рис. 1. Принципиальная схема установки для получения и ускорения кластерных ионов и атомов

При ускорении кластеров и ионов-мономеров до равных энергий взаимодействие кластеров с поверхностью будет значительно мягче, в то время как мономер индуцирует значительные повреждения.

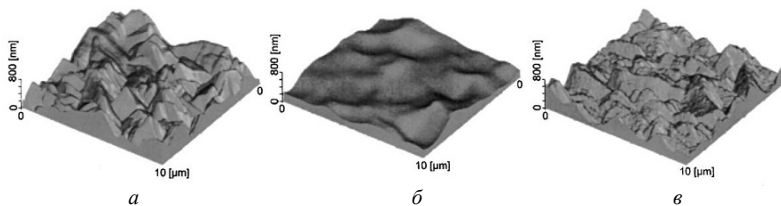


Рис. 2. АСМ изображения CVD-пленок алмаза, *a* - до облучения, *б* - после облучения кластерами Ag (20 кэВ , $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$), *в* - после облучения кластерами O_2 (20 кэВ , $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$)

На рис. 2 приведены АСМ изображения CVD-пленок алмаза до облучения (*a*), после облучения Ag (*б*), после облучения O_2 (*в*). На исходной поверхности множество выступов, средняя шероховатость 130 нм . После облучения кластерами Ag острые грани исчезли, и была получена достаточно гладкая поверхность. После воздействия кластерами O_2 качество поверхности почти не изменилось.

Исходя из преимуществ описанного метода над ХМП, он может быть успешно применен в технологии производства элементов нанoeлектроники для планаризации практически любых материалов до шероховатости не более единиц ангстрем.

**ПЛАНАРИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАРБИДА КРЕМНИЯ УСКОРЕННЫМИ
КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ**

**Е.П. Павлова¹, Н.И. Каргин¹, А.С. Гусев¹, С.М. Рындя¹, А.Е. Иешкин²*

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: ieshkin@physics.msu.ru

**SURFACE PLANARIZATION OF SILICON CARBIDE
BY ACCELERATED CLUSTER IONS**

**E.P. Pavlova¹, N.I. Kargin¹, A.S. Gusev¹, S.M. Ryndya¹, A.E. Ieshkin²*

¹National Research Nuclear University MEPhI,
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe sh., 31, e-mail: elenapawlowa@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, e-mail: ieshkin@physics.msu.ru

In this work, mechanically polished 6H-SiC samples were irradiated with a 30 keV gas cluster ion beam. Surface topology before and after the irradiation was studied with AFM. A substantial decrease of the average roughness (by 1,5–2 times) was found.

Одним из прорывных направлений развития технологии микро- и наноэлектроники на сегодняшний день является применение кластерных ионных и атомных пучков, в том числе для планаризации поверхности диэлектрических сверхтвердых материалов (таких, как поликристаллический CVD - алмаз, карбид кремния, сапфир, кварцевое стекло) до уровня шероховатости $\sim 0,1$ нм, недостижимого другими методами. В работе исследовалось влияние ионно-кластерного облучения на топологию поверхности пластин из кристаллов 6H-SiC, выращенных методом Лели. Образцы имеют кристаллографическую ориентацию $\langle 0001 \rangle$ и легированы азотом до концентрации $(1,8 \div 7) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Ионно-кластерная обработка осуществлялась с помощью установки *nAccel 100 (Exogenesis)*. Кластеры аргона, полученные при адиабатическом расширении газа через сверхзвуковое сопло, ионизировались и ускорялись напряжением 30 кэВ. Давление в рабочей камере составляло 3×10^{-4} торр. Перечень полученных образцов приведен в таблице 1.

Рельеф поверхности пластин 6H-SiC до и после воздействия пучка кластерных ионов изучался с помощью сканирующего зондового микроскопа *Solver Next (НТ-МДТ)*. Размер анализируемой области составлял 10×10 мкм. Количественный анализ топологии каждого образца прово-

дился для трех различных участков его поверхности. Затем значения шероховатости выбранных участков усреднялись. Типичные АСМ-изображения поверхности пластин 6H-SiC до и после обработки представлены на рис. 1.

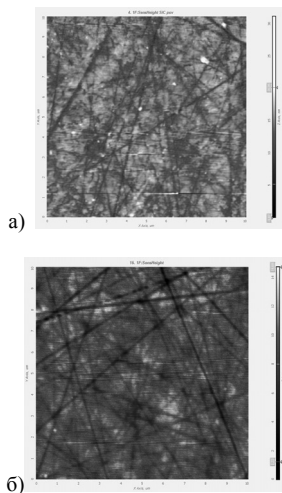


Рис. 1. АСМ изображения поверхности 6H-SiC
а) исходная поверхность до планаризации;
б) после 15 минут облучения ионно-кластерным пучком

Результаты, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о значительном сглаживании рельефа поверхности пластин 6H-SiC после обработки пучком кластерных ионов. Параметр Rq уменьшается в $1,5 \div 2$ раза, т.о. продемонстрировано, что газовые кластерные ионы являются эффективным инструментом финишной полировки поверхности карбида кремния. Однако полностью от так называемого «алмазного фона» (линейно структурированных дефектов) избавиться не удалось, что указывает на необходимость увеличения дозы облучения или энергии кластерных ионов, взаимодействующих с поверхностью SiC.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57814X0064).

Таблица 1

Параметры экспериментальный образцов

Номер образца	Время травления, мин.	Ускоряющее напряжение, кэВ	Средне-квадратичная шероховатость, R_q , нм	Средняя шероховатость, R_a , нм
№1 6H-SiC	0	-	2,2	1,7
	15	30	1,4	1,1
	45	30	1,4	1,1
	75	30	1,3	1,0
№2 6H-SiC	0	-	3,6	2,8
	15	30	2,4	1,9
	45	30	1,8	1,4

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОДУЛИРОВАННОЙ
ПО ТОЛЩИНЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ**

** А.О. Зотов, А.А. Перевалов, И.В. Сагунова*

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Россия, 124498, г. Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом
1, e-mail: sagunova@list.ru

THE FORMATION OF A HEIGHT-MODULATED DIELECTRIC FILM

** A.O. Zotov, A.A. Perevalov, I.V. Sagunova*

National Research University of Electronic Technology
Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina Square, Bld. 1,
e-mail: sagunova@list.ru

The local anodic oxidation process allows creating a constantly-heighted local dielectric mask. In the course of mask formation the scanning probe moves over a particular surface area applying simultaneous constant bias voltage in each scanning point (these bias voltage impulses have the same value and duration). It is obvious that if we need to create a dielectric mask with a different oxide thickness or a height-modulated film, it is necessary to vary the impulse duration or its value at different scanning field areas. This investigation illustrates the possibility of creating a height-modulated oxide by applying the method of local anodic oxidation based on any greyscale modulated mask when the impulse duration and its magnitude is varied proportionally to the greyscale intensity.

Процесс локального зондового окисления твердых материалов и сверхтонких проводящих пленок с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) детально начал изучаться сравнительно давно [1]. Нанолитография на основе локального зондового окисления является более дешевой, доступной и эффективной как для модификации свойств различных твердых материалов, так и для изготовления и изучения электрофизических свойств ряда активных и пассивных элементов наноэлектроники в лабораторных условиях. В [2] была предпринята попытка развития процесса локального зондового окисления для создания диэлектрической пленки, модулированной по толщине.

Для формирования локальной диэлектрической маски одинаковой толщины сканируют участок поверхности и в каждой точке растра, попадающей в область, соответствующую топологии будущей маски, на кантилевер подают одни и те же импульсы напряжения. Если необходимо

получить диэлектрическую маску с различной толщиной в различных ее участках, то этого можно достичь вариацией параметров импульсов напряжения в различных точках растра.



Рис. 1. АСМ изображение поверхности Ti после зондового окисления

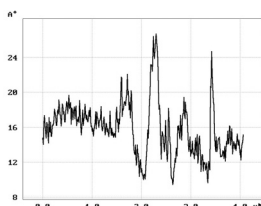


Рис. 2. Профиль сечения наноструктуры

Модуляция толщины маски в данном случае определяется задаваемой функцией изменения параметров импульса напряжения в различных точках растра. Подход является весьма эффективным для обеспечения воспроизводимого процесса формирования диэлектрической пленки по требуемому закону.

В частности процесс создания локальной диэлектрической маски, модулированной по толщине, продемонстрирован экспериментально на примере создания наноизображения с оригинала фотографии профессора Ж.И. Алферова. Сначала в память компьютера загружали растровое изображение маски, которую необходимо перенести на поверхность. Далее осуществляли сканирование поверхности пленки Ti на кремнии с целью обнаружения ровного участка поверхности пленки. При помощи статистической обработки растрового изображения строилась гистограмма распределения значений в пределах от 0 до 100%. Для переноса изображения на поверхность,

осуществляли зондовое окисление поверхности пленки Ti толщиной 8 нм с импульсами напряжения -10 В. Кантилеверы использовали с покрытием W_2C . В каждой точке растра длительность импульсов напряжения модулировалась в соответствии с тональностью рисунка. При последующем сканировании обработанной поверхности наблюдали наноразмерный рельеф (рис. 1, 2). Таким образом, данный случай иллюстрирует возможность создания на основе процесса локального зондового окисления сверхтонкой диэлектрической пленки, модулированной по толщине за счет применения процедуры изменения параметров импульса напряжения в процессе сканирования по заданному рисунку окисляемой поверхности.

Литература

1. Нанотехнологии в электронике. Под. ред. Чаплыгина Ю.А. М. Техносфера, (2005).
2. S. Lemeslho, S. Gavrilov et al., J. Nanotechnology, V 12, No 3, (2001).

**ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**Р.В. Захарченко, С.А. Шостаченко, Р.В. Рыжук, Н.И. Каргин*

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

THE USE OF THIN-FILM RESISTORS FOR TEMPERATURE CONTROL

**R.V. Zakharchenko, S.A. Shostachenko, R.V. Ryzhuk, N.I. Kargin*

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

In the present work, we investigated the dependence of the temperature coefficient of resistance (TCR) of the thin film resistor material. Thin film resistors based on compounds TaN, TiN and NiCr were deposited by reactive magnetron sputtering. As a substrate was used Al₂O₃. Operating pressure was $8.4 \cdot 10^{-4}$ Torr. Next, ohmic contacts based on a titanium were deposited. Temperature coefficient of resistance was determined by measuring the current-voltage characteristics at different temperatures on the probe station with a heated table.

The work was supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation (a unique identifier applied research RFMEFI58414X0001), in the framework of the base part of state assignment using the equipment center for collective use "Heterostructure microwave electronics and wide-band gap semiconductors physics of the NRNU MEPHI".

В данной работе была исследована зависимость температурного коэффициента сопротивления от материала тонкопленочного резистора.

Благодаря чувствительности к температуре терморезисторы используются в технологическом и лабораторном оборудовании, в цепях и схемах температурной стабилизации системы резисторных усилителей, а также в различных типах устройств и приборов измерения, регулировки и автоматики (замера, контроля уровня и автоматической регулировки климатического (температурного) и пожарного сигнализирования).

Тонкопленочные резисторы на основе соединений TaN, TiN и NiCr были нанесены методом реактивного магнетронного распыления на установке Kurt J. Lesker PVD 250. В качестве подложки был использован Al₂O₃. Рабочее давление в камере составляло $8.4 \cdot 10^{-4}$ торр. Омические контакты к тонкопленочным резисторам были сформированы на основе

титана. Температурный коэффициент сопротивления был определён с помощью измерения вольтамперных характеристик при различных температурах на зондовой станции с подогреваемым столиком и установке Agilent B1500. Измерения сопротивления были проведены в диапазоне температур 25÷300 °С. Полученная зависимость была аппроксимирована методом наименьших квадратов (результаты измерений показаны в табл. 1).

Таблица 1

Значения ТКС исследуемых материалов

Материал	ТКС, ppm/K
TaN	-21.9
TiN	80.5
NiCr	-48.2

Как видно из таблицы 1 наибольшей чувствительностью в заданном интервале температур обладает тонкопленочный резистор на основе соединения нитрида титана.

Немаловажным фактором в работе терморезисторов является их температурная устойчивость. Для этого был проведён отжиг в печи быстрого термического отжига в атмосфере воздуха при температурах 200÷600 °С с шагом 100 °С. После каждого отжига измерялось поверхностное сопротивление.

Для нитрида тантала оказалось, что при увеличении температуры отжига сопротивлению также увеличивалось. При отжиге 400°С увеличение сопротивления не превысило 5%, тогда как при 500°С увеличение составило уже 10%, и после 600°С значение сопротивления резко увеличилось на 64%. Для нитрида титана изменение поверхностного сопротивления при обработке до 600°С составило всего 5%, но свыше 600°С происходит резкое увеличение сопротивления. Результаты отжига нихрома – изменение при 400°С не превысило 10%, а при 600°С – 15%.

Отсюда видно, что нитрид титана не только самый чувствительный терморезистор, но и самый термостабильный из исследованных.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI58414X0001), в рамках базовой части государственного задания с использованием оборудования центра коллективного пользования «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников НИЯУ МИФИ».

**ТЕСТИРОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ
И НАДЕЖНОСТИ МЭМС НА КРЕМНИИ**

**Д.С. Веселов, Ю.А. Воронов*

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

**TESTING OF HEAT-INSULATING PROPERTIES
AND RELIABILITY OF SILICON MEMS**

**D.S. Veselov, Yu.A. Voronov*

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

The paper is devoted to the development of the unit for complex testing of sensitive elements in the pulse power supply mode and in the mode of mean time between failures. Measurement control of the developed unit is carried out using microcontroller Atmega8A-PU. Processing of the data is performed on the personal computer. For this purpose, was written and debugged the program, which realizes the measurements control. Temperature measurement is conducted using the indirect method, by measuring the resistance changes of resistive temperature sensors during the heating. The instrument error of the unit is about 3.8 degrees of Celsius.

Чувствительные элементы полупроводниковых датчиков концентрации газов работают при нагреве чувствительных слоев до температур в несколько сотен градусов Цельсия. Для обеспечения надёжной теплоизоляции чувствительных слоёв от подложки чувствительных элементов их формируют на мембранных конструкциях. Лучшими теплоизолирующими свойствами обладают диэлектрические мембранные конструкции. При разработке чувствительных элементов на основе диэлектрических мембранных конструкций для оптимизации их характеристик важно знать температуру в рабочей зоне мембраны. Кроме того, необходимо проводить тестирование готовых чувствительных элементов для коррективки режимов измерения [1–3].

Целью работы является разработка измерительной установки для проведения комплексных испытаний чувствительных элементов в импульсном режиме питания, а также в режиме наработки на отказ.

Разработана измерительная установка, позволяющая проводить измерения в следующих режимах. Режим имитация работы датчика в импульсном режиме питания чувствительного элемента. Позволяет определять время нагрева и охлаждения чувствительных слоёв и теплоизолирующие

свойств мембранных конструкций. Режим определения времени наработки на отказ. Позволяет определить количества циклов нагрева/охлаждения до момента обрыва мембраны или деградации резистивных датчиков температуры.

Основным элементом в логической схеме установки, представленной на рис. 1, является микроконтроллер ATmega8A-PU, который осуществляет управление процессами измерения характеристик чувствительного элемента. Для обеспечения возможности замены чувствительных элементов, в конструкции установки предусмотрено использование восьмивыводного разъёма. Каждый делитель напряжения представляет собой один измерительный канал установки. В измерительные каналы для резистивных датчиков температуры включены резисторы номиналом 440Ом, а в измерительный канал для резистивного нагревательного элемента включён резистор номиналом 120Ом. При таком выборе резисторов разница напряжения при комнатной температуре и при температуре до 800°С составляет $\Delta U = 1.5$ В, изменение напряжения на датчике температуры, при изменении его температуры на 1°С составляет 1.94мВ/°С. Приборная погрешность измерительной установки составляет 3.8°С.

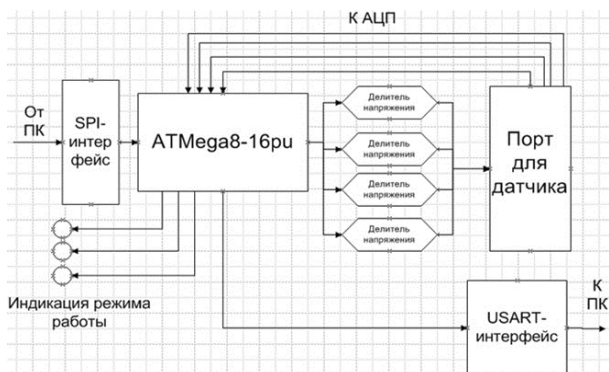


Рис. 1. Логическая схема измерительной установки

Разработана установка для проведения комплексных испытаний чувствительных элементов в импульсном режиме питания, а также в режиме наработки на отказ, подобрана элементная база, написана и отлажена программа, реализующая управление измерениями.

Литература

1. D.S. Veselov, Physics Procedia 72 500-503 (2015).
2. D.S. Veselov et.al., Physics Procedia 72 495-499 (2015).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РЕЛАКСАЦИИ В БАРЬЕРНЫХ СЛОЯХ
ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ
ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**О.А. Рубан, А.Н. Алешин, Н.А. Юзева*

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр.5, e-mail: myx.05@mail.ru

**DETERMINATION OF THE RELAXATION DEGREE IN THE BARRIER LAYERS
AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURES BY MEASURING
OF CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS**

**O.A. Ruban, A.N. Aleshin, N.A. Yuzeeva*

Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy
of Sciences, Moscow, 117105, Russia, e-mail: myx.05@mail.ru

The degree of relaxation in the barrier layer of AlGaN/GaN heterostructures was determined. It was based on measurements of capacitance-voltage characteristics of the AlGaN/GaN HEMT. The experimental polarization P_{exp} and the distribution of electron density were obtained from these measurements. The spontaneous P_{sp} and piezoelectric P_{pz} polarizations were calculated using modified Ambacher model. Then the degree of relaxation in the barrier layer of the HEMT-structure was calculated using P_{exp} , P_{sp} and P_{pz} . By comparison the degree of relaxation and the distribution of electron density the nature of observed electron traps was explained. Thus, it was shown that capacitance-voltage characteristics can be used for evaluation the quality of the crystalline structure of the barrier layer in AlGaN/GaN HEMT.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (high electron-mobility transistor, или HEMT) на основе широкозонных гетероструктур AlGaN/GaN применяются в мощных СВЧ-устройствах с рабочими частотами выше 8 ГГц (X-, Ku-, K-, Ka-диапазоны). Современные тенденции направлены на утонение барьерных слоев HEMT для уменьшения подзатворной емкости, для обеспечения более высоких рабочих частот транзисторов [1]. Поэтому влияние структурных дефектов в барьерных слоях на параметры транзисторов требует тщательного изучения.

В данной работе определялись степени релаксации напряжения в барьерных слоях HEMT-структур с треугольной квантовой ямой AlGaN/GaN. Образцы были выращены на подложках Al₂O₃ методом осаждения металлорганических соединений из газообразной фазы. Для всех

исследуемых НЕМТ-структур были проведены вольт-фарадные измерения, для этого были созданы двухзатворные НЕМТ.

Из измеренных вольт-фарадных характеристик было получено значение поляризации P_{exp} внутри каждой НЕМТ-структуры. По модифицированной модели Амбачера [2] были рассчитаны значения спонтанной P_{sp} и пьезоэлектрической P_{pz} поляризаций. Используя значения P_{exp} , P_{sp} и P_{pz} , для каждой НЕМТ-структуры было определено значение степени релаксации напряжения R в барьерном слое по формуле:

$$R = \left(1 - \frac{P_{\text{exp}} - P_{\text{sp}}}{P_{\text{pz}}} \right) * 100\% .$$

Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Поляризации и степени релаксации в исследованных НЕМТ-структурах: полученная из эксперимента P_{exp} , спонтанная P_{sp} , пьезоэлектрическая P_{pz} поляризации и степень релаксации напряжения R

№ образца	P_{exp} , Кл/м ²	P_{sp} , Кл/м ²	P_{pz} , Кл/м ²	R , %
1	-0,095	-0,09	-0,052	90
2	-0,105			71
3	-0,119			44

При сопоставлении значений R с рассчитанными профилями концентраций двумерного электронного газа было обнаружено наличие электронных ловушек и объяснена их природа. Чем больше степень релаксации R , тем заметнее пластическая деформация в НЕМТ-структурах, которая приводит к появлению дислокаций. В распределении электронной плотности в барьерных слоях присутствуют ловушки, которые предположительно являются дислокациями.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ, проект № 16-32-00552 «Исследование электрофизических и кристаллографических свойств гетероструктур AlGaIn/GaN для мощных СВЧ транзисторов».

Литература

1. Ю. Федоров, ЭЛЕКТРОНИКА наука | технология | бизнес, 2, 00108 (2011).
2. O. Ambacher, J. Phys. D: Appl. Phys. **31**, 2653 – 2710 (1998).

**ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ
УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО АЛМАЗА**

**Д.В. Громов¹, В.С. Фигуров², П.П. Мальцев³, А.Ю. Никифоров¹, В.А. Телец¹*

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

²АО «Экспериментальное научно-производственное объединение
«СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,
115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31

³Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр. 5. e-mail: iehfstaras@yandex.ru

**RADIATION EFFECTS IN ULTRAVIOLET SENSORS BASED
ON NATURAL DIAMOND**

**D.V. Gromov¹, V.S. Figurov², P.P. Maltsev³, A.Y. Nikiforov¹, V.A. Telets¹*

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

²Specialized Electron Systems, Russia, 115409 Moscow, Kashcirskoe shosse, 31

³Institute of Ultra – High Frequency Semiconductor Electronics Russian Academy of Science,
Russia, 117105 Moscow, Nagoni proezd, 7, b. 5. e-mail: iehfstaras@yandex.ru

Total dose and dose rate effects are investigated in ultraviolet sensors based on natural diamond with various concentrations of nitrogen impurity. Transient effects in the devices based on Pa-group natural diamond are described with a BARITT diode model.

Алмаз является перспективным материалом для создания датчиков УФ-диапазона благодаря характерному строению запрещенной зоны и высокой оптической прочности. Причем наилучших результатов удается достичь при использовании природных алмазов [1].

В данной работе приведены результаты исследования характеристик датчиков для регистрации УФ-излучения на основе природных алмазов при воздействии стационарного и импульсного гамма-излучения.

В качестве датчиков УФ-излучения использовались пластины природного алмаза типа Па с нанесенными серебряными контактами. Кристаллы датчиков были установлены в стандартные транзисторные корпуса без крышки, исследовались два образца приборов.

Радиационные испытания проводились на экспериментальной базе НИИ приборов. Импульсная гамма-установка характеризовалась средней длительностью импульса 22нс, испытания проводились до максимальных уровней мощности дозы $5.0 \cdot 10^{10}$ рад/с. Интенсивность источника стационарного

нарного гамма-излучения составляла 280 рад/с. Образцы испытывались в диапазоне доз $1.7 \cdot 10^4 \div 1.2 \cdot 10^6$ рад. Диапазон рабочих напряжений фоторезисторов $10 \div 100$ В. Для учета вклада в ток непосредственно кристалла датчика других составляющих, связанных с радиационным экспериментом (проводимость воздушных промежутков и диэлектрических элементов корпусов, электретных эффектов в кабельных линиях, токов натекания, обусловленных проведением измерений в ионизованной среде и т.д.) использовался аналогичный транзисторный корпус без кристалла («Свидетель»). Измерялись токи УФ датчиков без дополнительной подсветки.

Сводные данные для случая импульсного воздействия гамма-квантами приведены на рис. 1.

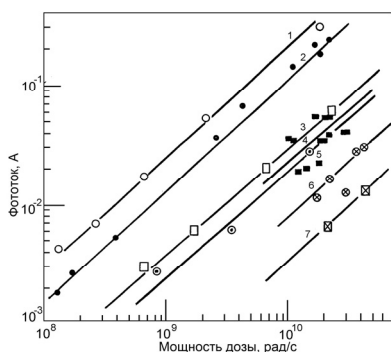


Рис. 1. Зависимости изменения фототока двух образцов датчиков УФ – излучения от мощности дозы: 1 – Обр. №2 со «свидетелем», $U_d = 100$ В; 2 – Обр. №2, $U_d = 100$ В; 3 – Обр. №1 со «свидетелем», $U_d = 100$ В; 4 – Обр. №1, $U_d = 100$ В; 5 – Обр. №2 со «свидетелем», $U_d = 10$ В; 6 – Обр. №2, $U_d = 10$ В; 7 – Обр. №1 со «свидетелем», $U_d = 100$ В

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что в рассматриваемом диапазоне доз гамма-излучения не наблюдается изменения темновых токов УФ датчиков. Существенный вклад вносят токи утечки, определяемые корпусом, в котором установлен кристалл.

Последний вывод справедлив и для случая импульсного воздействия гамма-излучения (см. рис. 1). Концентрация носителей, генерируемых при воздействии импульсного излучения, превышает собственную концентрацию свободных носителей в алмаз. При этом фототок определяется процессами ограничения тока пространственным зарядом и может быть оценен с помощью соотношений, полученных для VARITT диода [2].

Литература

1. D.V.Gromov et al, Ultraviolet Sensors Based on the Natural Diamond.- Eurosensors 10 th European Conf., 1996, Belgium V5, pp. 1441-1444.
2. R.G.Chaffin "Microwave semiconductor devices: Fundamentals and radiation effects". John Wiley & Sons, N.Y., 1973, pp. 137-138.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN**

**В.Г. Ходорович¹, Е.Ф. Певцов¹, В.В. Груздов², М.Е. Гусев²*

¹Московский технологический университет (МИРЭА),
Россия, 119459, Москва, пр-т Вернадского, 78, e-mail: pevtsov@mirea.ru

²ОАО «НПП «Пульсар»,
105187, Москва, Окружной проезд, дом 27, e-mail: kontsevov@pulsampp.ru

PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF HETEROSTRUCTURES AlGaN/GaN

**V.G. Khodorovich¹, E.Ph. Pevtsov, V.V. Gruzdov, M.E. Gusev,*

¹MIREA, Russia, Moscow, Pr. Vernadskogo, 78

²JSC «S&PE «Pulsar», Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

The aim of this work was to obtain new data on the defects in the structures based on GaN by photoluminescence method and the development of research techniques and methods express control of heterostructures before running them in manufacture of IC. During this work developed a prototype of the experimental stand for research of characteristics of the heterostructures of AlGaN/GaN by registering the intensity of the yellow luminescence.

Целью данной работы являлось получение новых данных о дефектах в структурах на основе GaN методом фотолюминесценции и разработка методик исследований и способов входного экспресс-контроля пластин с гетероструктурами перед запуском их в производство. Функциональная схема экспериментального стенда для исследований спектров фотолюминесценции гетероструктур AlGaN/GaN приведена на рис.1.

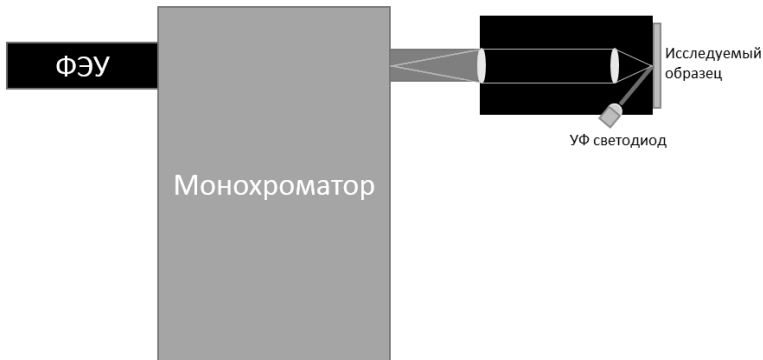


Рис. 1. Схема стенда для исследования спектров гетероструктур AlGaN/GaN

Состав стенда: монохроматор типа МУМ-1 с рабочим диапазоном длин волн 200–800 нм и с размером входной щели 0.05 мм, УФ светодиода UVTOP-270 с длиной волны 270 нм, ФЭУ «Hamamatsu Photonics H10722-20».

Спектры фотолюминесценции и катодолюминесценции GaN и гетероструктур на его основе обсуждаются, в частности, в [1]. Пики собственной катодолюминесценции GaN и AlGaN наблюдались, соответственно, при 3.45 эВ ($\lambda = 359$ нм) и 3.76 эВ ($\lambda = 331$ нм), а максимум «желтой» катодолюминесценции - при энергии 2.30 эВ ($\lambda = 564$ нм) [2]. На рис.2 показан типичный спектр фотолюминесценции гетероструктуры AlGaIn/GaN/сапфир, полученный с использованием указанной выше аппаратуры.

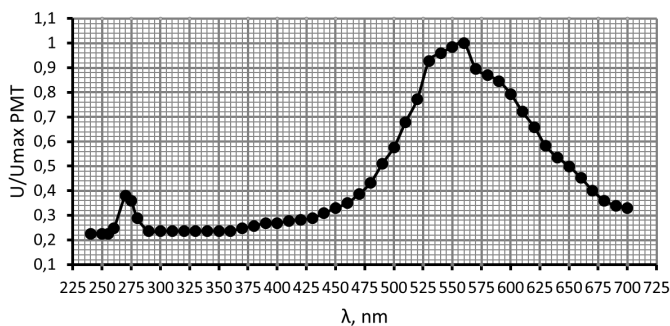


Рис. 2. Спектр фотолюминесценции гетероструктуры AlGaIn/GaN/сапфир

В результате исследований получено, что максимум «желтой» фотолюминесценции почти полностью совпадает со спектром катодолюминесценции, которая измерялась в работе [2]. Спектры собственного излучения слоев AlGaIn и GaN не наблюдаются, и это может быть связано с тем, что при рождении пар «электрон-дырка» горячие электроны переходят из Г-долины в долину M-L или в долину. Этот переход обусловлен изменением импульса и, следовательно, сопровождается образованием фононов, число которых экспоненциально растет с температурой. Таким образом, задачей последующих исследований является регистрация спектров фотолюминесценции при криогенных температурах.

Литература

1. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой /Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. М.: Техносфера, -328с (2016).
2. F.A. Ponce, D.P. Bour, W. Gotz and P.J. Wright /Appl. Phys. Lett. V/68, p.57 (1996).

**ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ И ФИОЛЕТОВЫХ СВЕТОДИОДОВ**

*Л.П. Авакянц¹, *А.Э. Аслаян¹, П.Ю. Бокон¹, В.В. Волков¹, Л.М. Коган²,
А.Н. Туркин¹, А.В. Червяков¹, А.Э. Юнович¹*

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
Россия, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В.Ломоносова, дом 1,
строение 2, физический факультет, e-mail: artuased@yandex.ru

²Научно-производственный центр опτικο-электронных приборов «ОПТЭЛ»,
Россия, 105187, г. Москва, Щербаковская улица, дом 53, e-mail: npcoptel@mail.ru

**DETAILS OF ELECTROLUMINESCENCE SPECTRA OF ULTRAVIOLET AND
VIOLET LIGHT-EMITTING DIODES**

*L.P. Avakyan¹, *A.E. Aslanyan¹, P.Yu. Bokov¹, V.V. Volkov¹, L.M. Kogan²,
A.N. Turkin¹, A.V. Chervyakov¹, A.E. Yunovich¹*

¹M.V.Lomonosov Moscow State University, physics faculty
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory 1-2, e-mail: artuased@yandex.ru

²Optic & electronic devices Scientific & manufacturing center «OPTTEL»
Russia, 105187, Moscow, Shcherbakovskaya street 53, e-mail: npcoptel@mail.ru

Electroluminescence spectra of UV and violet light-emitting diodes (LEDs) developed by “Optel - Center” Company were studied in a wide range of currents, $J = 10 - 350$ mA. LED spectral maxima were near $\lambda = 380$ nm ($\hbar\omega = 3,18$ eV, UV), and 411 nm ($\hbar\omega = 3,05$ eV, violet). Additional spectral band has been observed in the interval 2,22÷2,15 eV, which shifted correspondingly with the shift of the main band. Spectral form was analyzed by means of 2D-structure model with the band tails.

A review is given of UV LEDs research and development and their potential applications.

Исследованы спектры электролюминесценции светодиодов (СД) повышенной мощности ультрафиолетового (УФ) и фиолетового спектрального диапазона, разработанных НПЦ ОЭП «Оптэл» [1,2]. СД были сконструированы из кристаллов фирмы SemiLEDs на основе р-п-гетероструктур типа InGaN/AlGaIn/GaN с размерами $1,07 \times 1,07$ мм²; размеры р-п-гетеропереходов были $0,97 \times 0,97$ мм². Кристалл монтировался в специальный корпус для отвода тепла от р-п перехода.

Для измерений спектров электролюминесценции СД в широком интервале токов была автоматизирована установка на основе монохроматора МДР-12 и разработана новая компьютерная программа.

Спектры излучения СД в диапазоне токов от 10 до 350 мА имели основную полосу с максимумами в области длин волн λ от 380 (УФ диоды)

до 411 нм (фиолетовые) ($\hbar\omega = 3,18 \div 3,02$ эВ). Форма основных спектральных полос проанализирована на основе модели двумерных структур с «хвостами» плотности состояний в валентной зоне и зоне проводимости [3]. Анализ позволил оценить нагрев активной области структур при больших токах. Изменение положения максимума с увеличением тока объясняются как изменением эффективной ширины запрещенной зоны с нагревом диодов, так и изменением положения квазиуровней Ферми в активной области.

Кроме основных полос были обнаружены дополнительные спектральные полосы в видимой области, от $\hbar\omega = 2,22$ эВ до 2,15 эВ, положение максимума которых изменялось в соответствии с максимумом основной полосы. Интенсивность этих полос увеличивалась при продвижении в УФ область. Обсуждается возможная причина этой полосы: излучательная рекомбинация на глубоких уровнях в р-AlGaIn.

Проведен анализ вольтамперных характеристик, мощности излучения и эффективности преобразования энергии в СД.

Разработка полупроводниковых источников излучения в коротковолновой области спектра - УФ и фиолетовой связана с широкими областями их применения: фотолитография, средства обнаружения токсичных веществ, устройства хранения данных в оптическом диапазоне, биомедицинские исследования, очистка и стерилизация воды и воздуха и т.д. [4].

Дан обзор исследований и разработок СД на основе гетероструктур нитрида галлия и его твердых растворов в последние годы, направленных как на продвижение в более коротковолновую УФ область, так и на увеличение мощности излучения [5-12].

Литература

1. Н.А.Гальчина, Л.М.Коган, Н.П.Сощин, С.С.Широков, А.Э.Юнович, ФТП, **41**, №9, 1143-1148 (2007).
2. Л.М.Коган, А.А.Колесников, А.Н.Туркин, Светотехника (2016) *в печати*.
3. М.Л.Бадгутдинов, А.Э.Юнович. ФТП, **42**, №4, 438-446 (2008).
4. М.Л.Бадгутдинов, Н.И.Каргин, В.С.Пашков, А.Э.Юнович. 3-я Научно-практическая конф. по физ. и техн. наногетероструктурной СВЧ-эл-ки, тез. докл., 62-64 (2013).
5. M.A. Khan, K. Balakrishnan, T. Katona, Nature Photonics **2**, 77-84 (2008).
6. M.A. Khan, M. Shatalov, H.P. Maruska, H.M. Wang and E. Kuokstis, Japanese Journal of Applied Physics **44**, No. 10, 7191-7206 (2005).
7. H. Hirayama, J. Appl. Phys. **97**, 091101 (2005).
8. Yitao Liao et al, Appl. Phys. Lett. **98**, 081110 (2011).
9. K. Balakrishnan et al, Jpn. J. Appl. Phys. **49**, 040206 (2010).
10. H. Hirayama et al, Appl. Phys. Express **3**, 031002 (2010).
11. M. Shatalov et al, Appl. Phys. Express **5**, 082101 (2012).
12. T.Wunderer, J.E.Northrup, N.M.Johnson. In the book "III-Nitride Ultraviolet Emitters - Technology & Applications"; Springer-Verlag, 2015.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВЧ ФОТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ InAlAs/InGaAs/InP ГЕТЕРОСТРУКТУР

**Д.В. Дмитриев, Н.А. Валишева, А.М. Гилинский, И.Б. Чистохин,
А.И. Торопов, К.С. Журавлёв*

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, дом 13,
e-mail: ddmiriev@isp.nsc.ru

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF MICROWAVE PHOTODIODES
ON THE BASE OF InAlAs/InGaAs/InP HETEROSTRUCTURES**

**D.V. Dmitriev, N.A. Valisheva, A.M. Gilinsky, I.B. Chistokhin A.I. Toropov,
K.S. Zhuravlev*

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, pr. Lavrentieva, e-mail: ddmiriev@isp.nsc.ru

Ultra high frequency photodiodes have now been established as an important part for analog fiber links and microwave photonics applications.

In this work the study of molecular beam epitaxial (MBE) growth processes of InAlAs/InGaAs heterostructures on the InP substrates for photodiodes was carried out. The conditions of cleaning of the InP substrates surface suitable for MBE growth were determined. The growth conditions of undoped and doped InAlAs and InGaAs layers lattice-matched to the InP substrates were found. The optimal growth conditions of multilayer InAlAs/InGaAs heterostructures were established. The basics of technology of manufacture of the photodiode with the Schottky barrier were developed. The manufacturing technology includes the following processes: the mesa formation using wet and dry chemical etching, passivation of the diode's surface by dielectric layer, formation of ohmic contacts and the Schottky barrier.

На основе результатов расчетов и анализа литературных данных по созданию мощных СВЧ фотодиодов для линий аналоговой оптоволоконной связи и систем радиофотоники по совокупности параметров быстродействия и динамического диапазона был выбран вариант конструкции фотодиода с барьером Шоттки и меза-структурой на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) InAlAs/InGaAs на подложке InP [1, 2]. Конструкция ГЭС иллюстрируется таблицей 1. Для выращивания структур использовались установки молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Riber 32P и Comrast-21, оснащенные системами дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) и регистрации эволюции картин ДБЭО, обеспечившими возможность изучения реконструкции поверхности и атом-

ных процессов на ростовых поверхностях подложки InP и эпитаксиальной пленки.

Таблица 1

**Структура гетероэпитаксиальных слоёв
InAlAs/InGaAs/InP СВЧ-фотодиода Шоттки**

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	30 нм	Защитный слой
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	30 нм	Барьерный слой
InGaAlAs	50 нм	Варизонный слой
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	600÷1500 нм	Нелегированный поглощающий слой, толщина зависит от максимальной рабочей частоты
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As: Si } 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	50 нм	Поглощающий p+ слой
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As: Si } 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	300 нм	Контактный слой
подложка InP (001)	~ 400 мкм	

В рамках данной работы были проведены исследования, нацеленные на разработку базовой технологии изготовления фотодиодных структур на основе ГЭС InAlAs/InGaAs/InP, включающие следующие этапы: технология синтеза ГЭС методом МЛЭ, технологические процессы, обеспечивающие изготовление приборных структур СВЧ фотодиодов.

Определены условия получения атомарно чистой поверхности подложек (001)InP для роста слоев ГЭС методом МЛЭ (химическая подготовка и вакуумный отжиг). Выбраны условия выращивания нелегированных и легированных слоев InAlAs и InGaAs, согласованных по параметрам кристаллической решетки с подложкой InP. Определены оптимальные условия роста многослойных ГЭС InAlAs/InGaAs. Разработан технологический маршрут изготовления СВЧ фотодиодов. Исследованы физико-химические и технологические процессы изготовления меза-структур на основе ГЭС InAlAs/InGaAs: жидкостного и сухого травления ГЭС, формирования пассивирующих диэлектрических покрытий, создания омических контактов и формирования барьера Шоттки. Изготовлены макеты СВЧ фотодиодов различного диаметра и изучены их статические параметры. Изготовленные диоды характеризуются значениями темнового тока 2÷4 нА при обратном напряжении –2 В и коэффициентом идеальности прямой ветви вольт-амперной характеристики 1.6÷2.1.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-29-08124.

Литература

1. И.Б. Чистохин, К.С. Журавлев, УПФ, т.3, №1, с. 92-100 (2015).
2. L. J. J. Tan et al, IEEE J. Quantum Electron., vol. 46, 1153 (2010).

**РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО
КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА С ДВОЙНЫМ
МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ
НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ GaAs/AlGaAs ГЕТЕРОСТРУКТУР**

**Р.А. Хабибуллин¹, Н.В. Шаверук¹, А.Ю. Павлов¹, Д.Н. Славовский¹,
Р.Р. Галиев¹, К.Н. Томош¹, Д.С. Пономарев¹, Г.Э. Цырлин², А.Е. Жуков²*

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

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет РАН Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, дом 8

**DESIGN AND FABRICATION OF TERAHERTZ QUANTUM CASCADE LASER
WITH DOUBLE METAL WAVEGUIDE BASED ON MULTILAYER
GaAs/AlGaAs HETEROSTRUCTURES**

**R.A. Khabibullin¹, N.V. Shchavruk¹, A.Yu. Pavlov¹, D.N. Slapovskiy¹, R.R. Galiev¹,
K.N. Tomosh¹, D.S. Ponomarev¹, G.E. Cirilin², A.E. Zhukov²*

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

²St Petersburg National Research Academic University of RAS, Russia, 194021 St Petersburg, Khlopina 8

We have designed GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As multilayer heterostructure with diagonal transitions and optimized oscillator strength – 0.425. Furthermore, we have developed a technique for the fabrication of terahertz quantum cascade laser (THz QCL) with double metal waveguide via low-temperature In-Au wafer bonding followed by substrate removal. Inductively coupled plasma reactive ion etching in BCl₃/Ar at 15:15 sccm has been used to obtain ridge structure of various widths with vertical sidewalls.

С момента первой успешной реализации терагерцового квантово-каскадного лазера (ТГц ККЛ) в 2002 г. до сегодняшнего дня, произошло беспрецедентное развитие данного направления с точки зрения фундаментальной науки, полупроводниковых технологий и коммерческой заинтересованности из-за актуальных областей применения ТГц ККЛ: здравоохранение (медицинская диагностика дыхания человека) и системы безопасности двойного назначения [1]. Одной из главных проблем ТГц ККЛ являются низкие рабочие температуры, что связано с чрезвычайно малой энергией ТГц фотона. Целью данной работы является разработка многослойных GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As гетероструктур (МГ) с диагональными излучательными переходами и постростовая обработка МГ для изготовления ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом, т.к. ТГц ККЛ данного типа демонстрируют наибольшие рабочие температуры.

На основании расчета силы осциллятора для переходов между уровнями размерного квантования (рис. 1), возникающих в прямо смещенных МГ, методом молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены две МГ, содержащие 228 каскадов: ККЛ-1 – 43/75.6/24.6/69.3/41/136; ККЛ-2 – 43/89/24.6/81.5/41/160 (толщины слоев указаны в ангстремах, полужирным шрифтом выделены толщины барьеров $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$). В работе [2] представлены результаты исследования выращенных МГ методами рентгеновской дифракции и спектроскопии фотолюминесценции.

Постростовая обработка МГ включала в себя In-Au бондинг МГ к легированной подложке n+-GaAs, механическое утонение подложки МГ до толщины ~50 мкм, селективное жидкостное травление подложки МГ до стоп-слоя $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ и последующее травление стоп-слоя, сухое травление гребневых мезаполосков ТГц ККЛ через маску металлизации Ti/Au с шириной 50 и 100 мкм. Подобраны режимы реактивного ионного травления в индуцировано-связанной плазме в смеси газов BCl_3/Ar для получения вертикальных стенок гребневых мезаполосков ТГц ККЛ и минимального распыления маски Ti/Au (рис. 2). Таким образом, были изготовлены гребневые мезаполоски ТГц ККЛ, в которых активная область толщиной 8.5 и 10 мкм (ККЛ-1 и ККЛ-2) заключена между верхним электродом Ti/Au и “нижним металлом” In/Au, что представляет собой двойной металлический волновод для терагерцового излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов Президента РФ № 14.W01.16.6081-МК и РФФИ № 16-29-03110 офи_м.

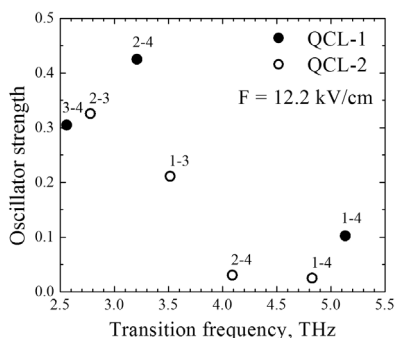


Рис. 1. Соотношение между силой осциллятора и частотой переходов для ККЛ-1 и ККЛ-2

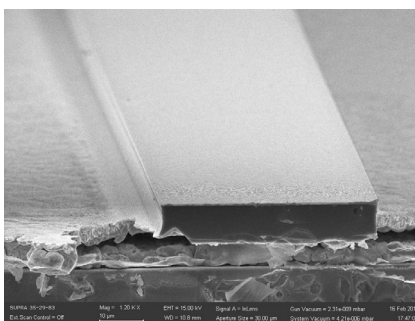


Рис. 2. Гребневый мезаполосок ТГц ККЛ с шириной 50 мкм

Литература

1. M.A. Belkin and F. Capasso, Phys. Scr. **90**, 118002 (2015).
2. А.Е. Жуков и др., ФТП **5**, стр. 674 (2016).

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

**В.В. Безотосный^{1,2}, О.Н. Крохин^{1,2}, В.А. Олещенко, В.Ф. Певцов,
Ю.М. Попов^{1,2}, Е.А. Чешев^{1,2}*

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Каширское шоссе д.31, e-mail: vvbezotosniy@mephi.ru
² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва 119991,
Ленинский проспект 53, e-mail: victorbe@sci.lebedev.ru

THE WAYS TO INCREASE THE POWER OF LASER DIODE

**V.V. Bezotosny^{a,b}, O.N. Krokhin^{a,b}, V.A. Oleshchenko^b,
V.F. Pevtsov^b, Yu.M. Popov^{a,b}, E.A. Cheshev^{a,b}*

^a National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoe shosse 31, 115409, Moscow, Russia,

^b P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninsky Prospect 53,
119991, Moscow, Russia

We discuss the experimental results of output power and thermal resistance measurements for 980 nm laser diodes with 4 mm resonators assembled at C-mount and F-mount copper heatsinks. Reliable CW output power of 15 W was obtained for LD at F-mounts. Thermal resistance R_{therm} of 5K/W and 1.9K/W was obtained for our LDs assembled at C-mount and F-mount respectively in comparison with the best published results 2K/W at copper-diamond sub-mounts under conduction cooling and 1.5K/W for the same heatsink design and micro-channel cooling.

Повышение ресурсной и предельной мощности [1-2], а также яркости лазерных диодов [3] не теряет своей актуальности. В [4] изучались лазерные диоды на 980 нм полосковым контактом 95 мкм, в [5] исследовался их тепловой режим при различных типах сабмаунтов, в [6] получена ресурсная мощность 15 Вт. В данной работе проведены сравнительные исследования мощности, спектров излучения и теплового сопротивления при монтаже идентичных чипов на медных теплоотводящих элементах типа F - маунт и C – маунт. Изготовленные лазеры при монтаже на F – маунтах устойчиво работали до выходной мощности 20 Вт, для C-маунтов соответствующий уровень мощности не превышал 12 Вт. Тепловое сопротивление R_{therm} измерялось на C-маунтах и F –маунтах. R_{therm} согласно [7] составило для обсуждаемых чипов ЛД на 980 нм около 2К/Вт для резонатора 4 мм, монтаже на сабмаунты медь-алмаз и кондуктивным охлаждении. При микроканальном жидкостном охлаждении по-

лучено значение 1.5 К/Вт. Усреднённые значения R_{therm} для наших ЛД смонтированных на медных С-маунтах и F –маунтах составили, соответственно, 5 К/Вт и 1.9 К/Вт, что свидетельствует о достаточно высоком уровне технологий монтажа, поскольку монтаж чипов производился непосредственно на медные теплоотводящие элементы без использования согласованных по к.т.р. сабмаунтов с высокой теплопроводностью.

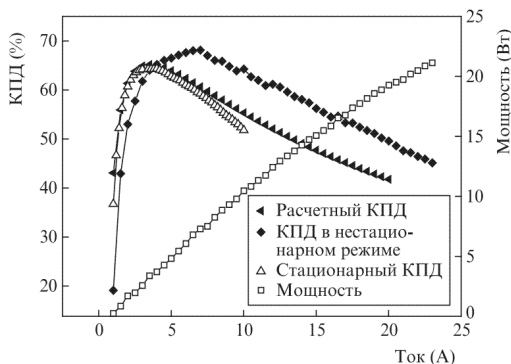


Рис.1. Ватт-амперная характеристика и полный КПД лазерного диода спектрального диапазона 980 нм

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ. Соглашение № 14.575.21.0047, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047.

Литература

1. Crump P., Blume G., Paschke K., Staske R., Pietrzak A., Zeimer U., Einfeldt S., Ginolas A., Bugge F., Häusler K., Ressel P., Wenzel H., Erbert G. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **7198**, 719814-1 (2012).
2. Crump P., Erbert G., Wenzel H., Frevert C., Schultz C.M., Hasler K.-H., Staske R., Sumpf B., Maaßdorf A., Bugge F., Knigge S., Trankle G. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **19** (4), 1501211 (2013).
3. P.Crump*, H. Wenzel, G. Erbert and G. Trankle. Proceedings. of SPIE Vol. **8241** 82410U-(1-10).
4. В.В.Безотосный, О.Н.Крохин, В.А.Олещенко, В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев. «Квантовая электроника», **44**, № 2 (2014), 145-148.
5. В.В. Безотосный, О.Н.Крохин, В.А. Олещенко, В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев «Квантовая электроника», **44**, № 10, 2014, 899-902.
6. В.В.Безотосный, О.Н.Крохин, В.А.Олещенко, В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, Е.А.Чешев «Квантовая электроника», **45**, № 12 (2015), 1088-1090.
7. P. Crump, M. Ekterai, C. M. Schultz, G. Erbert and G. Trankle. 2014, IEEE International Semiconductor Laser Conference p. 23-24.

**ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ ДЛЯ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР ВЕРТИКАЛЬНО
ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ****К.О. Воронаев^{1,2}, А.С. Ионов², Б.И. Селезнев¹*

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

²ОАО «ОКБ-Планета», Россия, 173004,
г. Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, дом 2/13,

**OHMIC CONTACT FOR NANOGETEROSTRUCTURE VERTICAL CAVITY SURFACE
EMITTING LASERS****K.O. Voropaev^{1,2}, A.S. Ionov², B.I. Seleznev¹*

¹Novgorod State University, Russia, 173003, Velikiy Novgorod,
st. Bolshaya St. Peterburgskaya, 41. e-mail: novsu@novsu.ru

²OJSC "OKB-Planeta", Russia, 173004, Velikiy Novgorod, st. Fedorovskiy Ruchey, 2/13.

The paper presents the research of ohmic contact for nanoheterostructure vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL). This multilayer structure comprising of the following layers: distributed Bragg reflector of Ga_{1-x}Al_xAs n- and p-type, aperture layer, active layer and substrate of GaAs. Researching ohmic contact based on metallic layers: Ti-Pt-Au for p-type, AuGe/Mo(Ni)/Au for n- type. Was compared efficiency of diffusion barrier based on Mo and Ni. Was analyzed a few parameters ohmic contacts: electrical resistivity, morphology and appearance.

Анализ литературы показывает, что вертикально излучающие диоды (ВИЛ) являются перспективными источниками оптического сигнала для быстродействующих систем связи. В последние годы ВИЛ находят все более широкое применение в датчиках и сенсорах различного типа [1]. Для создания кристаллов ВИЛ используется сложная наногетероструктура на подложке GaAs (рис. 1).

Омические контакты формируются на поверхности брэгговских зеркал. Верхнее зеркало состоит из чередующихся слоев Ga_{1-x}Al_xAs p- типа проводимости. Толщины слоев варьируются в диапазоне 20÷48 нм. Нижнее зеркало сформировано аналогично верхнему, но имеет n- тип проводимости.

При исследовании омических контактов осуществлялись эксперименты по подбору состава металлизации, а также режимов последующего формирования металлизированного рисунка. Кроме того, был проведен сравнительный анализ диффузионных барьеров на основе Ni и Mo.

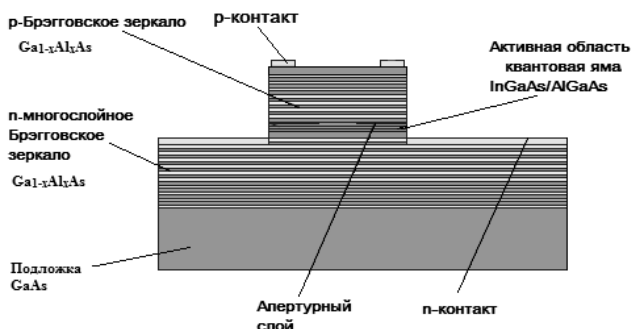


Рис. 1. Схематическое изображение наногетероструктуры для ВИЛ

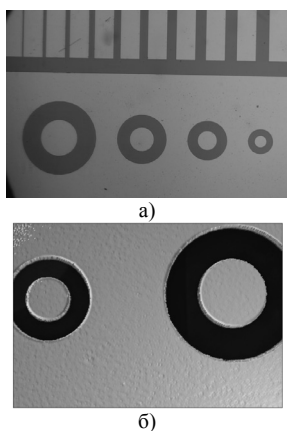


Рис. 2. Внешний вид (а) и морфология (б) полученного омического контакта на основе системы металлов Au/Ge/Mo/Au. Толщина Mo – 50 нм, температура отжига – 360 °С, время отжига – 60 с, шероховатость поверхности – 1.55 нм

В результате экспериментальных исследований установлено, что при отжиге контакта для полупроводника р-типа на основе металлов Ti/Pt/Au в диапазоне температур 360÷400°С не наблюдается деградации, происходит уменьшение контактного сопротивления и улучшается линейность вольт-амперной характеристики.

Литература

1. Thor Ansbaek, Claus H. Nielsen, Soren Dohn, David Larsson, Il-Sug Chung et al., "Low-energy-consumption hybrid lasers for silicon photonics", Appl. Phys. Lett. 101, 143505, 2012.

После напыления металлических пленок проводился быстрый термический отжиг (БТО) полученных систем в атмосфере азота. В дальнейшем исследовались следующие характеристики полученных омических контактов: внешний вид, морфология поверхности контактов, удельное сопротивление.

Установлено, что в системе для п-контакта Au/Ge/Mo(Ni)/Au в роли диффузионного барьера предпочтительнее использовать Mo. При этом температура отжига должна составлять 360°С, так как при такой температуре не наблюдается деградации поверхности металлизации, морфология поверхности остается гладкой, а удельное сопротивление омического контакта не превышает значение 10^{-5} Ом·см².

В результате экспериментальных исследований

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ СЕНСОРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ПРИ
КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

*И.С. Васильевский¹, А.Н. Виниченко¹, М.Н. Стриханов¹, Н.И. Каргин¹, Т. Куче²,
К. Рогачки³, *И.А. Большакова⁴, Я.Я. Кост⁴, А.П. Мороз⁴, Ф.М. Шурыгин⁴, А.В. Васильев⁴*

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

²University of Wisconsin-Madison
USA, 53726, Wisconsin, Madison, University Ave, 1848, e-mail: tfkuech@wisc.edu

³International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures
Poland, 53-421, Wrocław, ul. Gajowicka, 95, e-mail: krzysztof.rogacki@ml.pan.wroc.pl

⁴Национальный университет «Львовская политехника»,
Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, дом 12, e-mail: inessa@mail.lviv.ua

**INVESTIGATION OF SEMICONDUCTING MATERIALS
FOR MAGNETIC FIELD SENSORS IN STRONG MAGNETIC
FIELDS UNDER CRYOGENIC TEMPERATURES**

*I.S. Vasil'evskii¹, A.N. Vinichenko¹, M.N. Strikhanov¹, N.I. Kargin¹, T. Kuech²,
K. Rogacki³, *I.A. Bolshakova⁴, Ya.Ya Kost⁴, A.P. Moroz⁴, F.M. Shurygin⁴, A.V. Vasyliiev⁴*

¹National Research Nuclear University «MEPHI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye Shosse 31, e-mail: ivasilevskii@mail.ru
²University of Wisconsin-Madison, USA, 53726, Wisconsin, Madison, University Ave, 1848,
e-mail: tfkuech@wisc.edu

³International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures
Poland, 53-421, Wrocław, ul. Gajowicka, 95, e-mail: krzysztof.rogacki@ml.pan.wroc.pl

⁴Lviv Polytechnic National University
Ukraine, 7901312, Lviv, Bandera Street 12, e-mail: inessa@mail.lviv.ua

Influence of strong magnetic fields $B > 3$ T under cryogenic temperatures (1.5 ÷ 4.2) K on the signals of Hall sensors based on single-crystal whiskers (InSb, InAs) and nano-sized heterostructures (InSb/i-GaAs, InAs/i-GaAs) have been investigated. There are distinct Shubnikov-de Haas oscillations for whisker-based sensors, whereas heterostructures-based sensors demonstrate the linear field dependence of the output signal. This difference explained by the higher concentration of structure defects in the heterostructures. The derived results confirm the operability of Hall sensors based on indicated heterostructures for the magnetic fields diagnostics in the temperature and field conditions of modern particle accelerators and fusion reactors.

Высокие требования к точности измерения магнитного поля предъявляются в современных ускорителях заряженных частиц, в том числе колайдерах CERN и NICA, а также в термоядерных реакторах нового поколения, таких как токамаки JET (Великобритания), TORE SUPRA (Франция) и строящийся ITER (Франция).

Наиболее перспективными материалами для сенсоров магнитного поля в токамаках и ускорителях заряженных частиц, являются бинарные соединения III и V групп – антимонид (InSb) и арсенид (InAs) индия.

Повышение точности магнитоизмерительной аппаратуры в ускорителях и токамаках осложняется экстремальными условиями работы: сильные магнитные поля $B = (1 \div 8)$ Тл, широкий диапазон температур $T = (4,2 \div 600)$ К, радиационные нагрузки вплоть до высоких флюенсов нейтронов $F = 10^{18}$ н·см⁻². Известно, что для полупроводниковых сенсоров с высокой подвижностью носителей заряда при криогенных температурах в полях $B > 3$ Тл наблюдается нелинейность выходного сигнала, вызванная квантовыми осцилляциями Шубникова - де Гааза. Причина осцилляций состоит в последовательном пересечении уровня Ферми уровнями Ландау в квантуемом магнитном поле, при котором происходит периодическое изменение плотности состояний. Квантовые осцилляции ограничивают точность измерения магнитного поля такими сенсорами. Для определения величины квантовых осцилляций были проведены исследования полевой зависимости выходных сигналов сенсоров, изготовленных на основе (1) монокристаллических вискерсов InSb и InAs и (2) тонкопленочных гетероструктур InSb/i-GaAs и InAs/i-GaAs. Исследования проводились в Международной Лаборатории Сильных Магнитных Полей и Низких Температур (г. Вроцлав, Польша) на сверхпроводящем соленоиде Oxford Instruments MN-1, который позволяет проводить измерения при $B = (-14 \div 14)$ Тл и $T = (1,5 \div 300)$ К.

При $B > 3$ Тл и $T = (1,5 \div 4,2)$ К для сенсоров на основе микрокристаллов InSb и InAs наблюдается осцилляционный характер холловского сигнала. При этом величина амплитуды квантовых осцилляций уменьшается с ростом концентрации носителей заряда.

Полевая зависимость выходного сигнала для сенсоров на основе гетероструктур InSb/i-GaAs и InAs/i-GaAs имеет линейный характер во всем исследованном диапазоне B и T . Это связано с тем, что тонкие слои InSb и InAs, выращенные на подложках GaAs, являются более дефектными в сравнении с монокристаллами из-за рассогласования параметров решетки активного слоя и подложки. Известно, что с увеличением дефектности структуры возрастает факторы рассеяния носителей, и квантовые осцилляции в таких структурах не наблюдаются.

Линейная зависимость выходного сигнала сенсоров на основе гетероструктур InSb/i-GaAs и InAs/i-GaAs свидетельствует о возможности их использования при криогенных температурах и сильных магнитных полях, что делает их перспективными для применения в таких проектах как CERN, ITER и DEMO.

**СЕНСОРНЫЙ КАРТОГРАФ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

*И.С. Васильевский¹, *И.А. Большакова², Р.Л. Голяка², Н.И. Каргин¹,
Я.Я. Кость², М.Н. Стриханов¹, М. Kumada³, Ф.М. Шурыгин², А.В. Васильев²*

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

²Национальный университет «Львовская политехника»,

Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, дом 12, e-mail: inessa@mail.lviv.ua

³National Institute of Radiological Science,

Japan, 263-8555, Chiba, Anagawa, 4-9-1, e-mail: infofeynman@gmail.com

**THE SENSORY CARTOGRAPHER OF THE MAGNETIC FIELD
FOR A CHARGED-PARTICLE ACCELERATOR**

*I.S. Vasil'evskii¹, *I.A. Bolshakova², R.L. Holyaka², N.I. Kargin¹, Ya. Ya. Kost²,
M.N. Strikhanov¹, M. Kumada³, F.M. Shurygin², A.V. Vasyliiev²*

¹National Research Nuclear University «МЕРФИ»,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoye Shosse 31, e-mail: ivasilevskii@mail.ru

²Lviv Polytechnic National University,

Ukraine, 7901312 Lviv, Bandera Street 12, e-mail: inessa@mail.lviv.ua,

³National Institute of Radiological Science,

Japan, 263-8555, Chiba, Anagawa, 4-9-1, e-mail: infofeynman@gmail.com

The magnetic field mapper for the cyclotron magnet with complex distribution of induction has been manufactured. The mapper comprises of the matrix of 48 small-scale semiconductor Hall sensors, the electronic commutation and the signal acquisition units. The sensors are radially located in the magnet gap on the base disc surface. When the disk rotation occurs, such configuration allows simultaneously recording the 48 angular distributions of induction at different distances from the magnet axis. It also gives a possibility to calibrate the sensors in magnet gap under working conditions. The obtained measurement accuracy is 0.01% and the range of recorded fields is (-1.5÷1.5)T.

В современных ускорителях заряженных частиц типа циклотрон используются магнитные системы сложной геометрии, что делает актуальной задачу экспериментального исследования структуры их магнитных полей для оптимизации рабочих режимов. В Национальном Институте Радиологических Наук (Япония) был разработан цилиндрический постоянный магнит (диаметр ~ 1 м) с неоднородным распределением поля для циклотрона медицинского назначения. Задача настоящей работы – создание системы картографирования циклотронного магнита большого диаметра.

Как показал анализ проблемы, для измерения распределения полей больших магнитов наиболее эффективно применять матрицы сенсоров

Холла (количеством от 10 до 50 шт. в зависимости от размеров магнита) в сочетании с многоканальной измерительной системой.

В данной работе используются датчики на основе эпитаксиальных гетероструктур InSb/i-GaAs с концентрацией носителей $n \approx 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для увеличения пространственного разрешения *in-plane* размеры чувствительных элементов выбраны равными $600 \times 286 \text{ мкм}^2$ при толщине $\sim 1 \text{ мкм}$. Для изготовления зондов с сенсорами разработана методика позиционирования, которая позволяет добиться параллельности между чувствительным элементом сенсора и базовой площадью зонда с точностью не хуже 0.5° . При токе питания 10 мА чувствительность сенсоров составляет $\sim 100 \text{ мВ/Тл}$.

В отличие от ранее известных методов картографирования в данной работе сенсоры располагаются радиально на поверхности массивного диска, который размещается соосно с магнитом в его зазоре. Диск с помощью шагового двигателя вращается вокруг оси таким образом, что сенсоры двигаются по окружностям, проходя зоны максимального (Hill) и минимального (Valley) поля и регистрируя угловое распределение индукции $B(\varphi)$ на фиксированном расстоянии r от оси симметрии магнита. Новизна данного подхода состоит также в возможности калибровки датчиков непосредственно в рабочих условиях циклотрона. Для этого применяется эталонный ЯМР-магнитометр, зонд которого располагается рядом с калибруемым сенсором в области с высокой однородностью поля (вблизи середины зоны «Hill» или «Valley»).

Изготовленный в данной работе картограф использует матрицу из 48 датчиков Холла. В состав его измерительной системы входят блок обработки измерительных сигналов (обеспечивает высокоточное аналого-цифровое преобразование и обмен информацией с ЭВМ) и два блока мультиплексоров (каждый обеспечивает стабилизацию режимов питания, усиление и коммутацию сигналов 24 сенсоров).

На рис. 1 показаны распределения $B(\varphi)$, полученные для разных r . Точность измерения поля составляет порядка 0.01%.

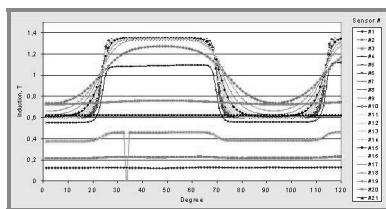


Рис. 1. Результаты картографирования поля магнита циклотрона

ет регистрировать B в широком интервале значений, $(-1.5 \div 1.5) \text{ Тл}$, а также оценивать градиентные характеристики сильно неоднородных полей. Это делает его уникальным инструментом для исследования полей аксиально-симметричных магнитных систем.

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА
С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ СЕЛЕНИДА КАДМИЯ**

**И.В. Крылов¹, К.А. Дроздов¹, А.С. Чижов², М.Н. Румянцева²
Р.Б. Васильев², Д.Г. Филатова², А.М. Абакумов², А.М. Гасквов²*

¹Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия, e-mail: iv.krylov@physics.msu.ru

²Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова,
химический факультет, Москва, Россия

**SEMICONDUCTOR GAS SENSORS BASED ON NANOCRYSTALLINE ZnO
SENSITIZED WITH CdSe QUANTUM DOTS**

**I.V. Krylov¹, K.A. Drozdov¹, A.S. Chizhov¹, M.N. Rumyantseva²,
R.B. Vasiliev², D.G. Filatova², A.M. Abakumov², A.M. Gaskov²*

¹ Physics Department, Moscow State University, Leninskie Gory 1-2,
Moscow 119991, Russia, e-mail: iv.krylov@physics.msu.ru

²Chemistry Department, Moscow State University, Leninskie Gory 1-3,
Moscow 119991, Russia

In this work we investigated the optical, photoelectric and sensor properties of nanocrystalline zinc oxide (ZnO) thin films with CdSe colloidal quantum dots. Nanocrystalline ZnO was synthesized by the precipitation method. Colloidal CdSe quantum dots were obtained by high temperature colloidal synthesis.

Absorption spectra were obtained for powder structures ZnO, CdSe QDs solution and powder ZnO structures with CdSe QDs in the visible range. For the ZnO/CdSe structure photoconductivity spectrum was obtained. Photoconductivity and absorption spectra demonstrate clear correlations.

Room temperature electrical resistance of ZnO-based samples under periodic green light illumination depending on oxygen content in the gas phase were investigated. The obtained results indicate that nanocrystalline semiconductor oxides sensitized with CdSe QDs can be used for NO₂ detection under visible light illumination at room temperature without any thermal heating.

Одними из основных недостатков современных полупроводниковых газовых сенсоров являются сравнительно высокая рабочая температура и высокое энергопотребление. Поэтому, в настоящее время проводятся исследования, в которых чувствительность сенсоров поднимается путем облучения ультрафиолетовым излучением. Однако ультрафиолетовое излучение не позволяет значительно снизить энергопотребление полупроводниковых газовых сенсоров. Представляется выгодным использо-

вать для фотоактивации сенсоров солнечное излучение в видимом диапазоне. Это можно сделать путем фотосенсибилизации исходной структуры коллоидными квантовыми точками (КТ).

В работе исследовались оптические, фотоэлектрические и сенсорные свойства нанокристаллических тонких пленок ZnO с коллоидными квантовыми точками CdSe. Образцы были синтезированы на кафедре неорганической химии химического факультета МГУ. Нанокристаллический оксид цинка (ZnO) был получен методом осаждения. Коллоидные квантовые точки CdSe были получены с помощью коллоидного синтеза при высокой температуре.

Были получены спектры поглощения для порошковых структур ZnO, раствора КТ CdSe и порошковых структур ZnO с КТ CdSe в видимом диапазоне электромагнитного излучения. Для чистого ZnO наблюдается сильное поглощение до длины волны 425 нм. При этом КТ в растворе демонстрируют существенное поглощение начиная с 550 нм. В спектрах порошковых структур с КТ имеются особенности отвечающие поглощению ZnO и КТ. Для структуры ZnO/CdSe был получен спектр фотопроводимости. На нем прослеживаются особенности соответствующие спектрам поглощения. Это говорит о том, что в системе осуществляется зарядовый обмен между квантовыми точками и исходной матрицей.

Исследовалась зависимость электрического сопротивления образцов при периодической засветке зеленым светом ($\lambda_{\text{max}} = 535$ нм) в зависимости от содержания кислорода при комнатной температуре. Обнаружено, что ростом концентрации кислорода значения сопротивления в темновых условиях и при подсветке возрастают, что сопровождается увеличением эффективного фотоотклика структуры. Полученные данные могут быть объяснены с помощью модели предложенной в статье [1]. Измерения сенсорных свойств показали, что полученные наноконпозиты ZnO/CdSe можно использовать для обнаружения NO₂ при активации видимым ($\lambda_{\text{max}} = 535$ нм) излучением при комнатной температуре без какого-либо теплового нагрева.

Литература

1. D. Hou, A. Dev, K. Frank, A. Rosenauer, T. Voss, Oxygen-controlled photoconductivity in ZnO nanowires functionalized with colloidal CdSe quantum dots, J.Phys. Chem. C 116 (2012) 19604–19610.

**РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИИ АКСЕЛЕРОМЕТРА
С ВЫСОКИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ****Д.С. Веселов, Ю.А. Воронов*

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

MODELING OF ACCELEROMETER WITH HIGH DYNAMIC RANGE**D.S. Veselov, Yu.A. Voronov*

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

The aim of this paper is the modeling of accelerometer with dynamic range of 10 orders of magnitude. The construction of accelerometer with two sensitive elements of capacitive type located on the one substrate is proposed. Sensitive elements possess the same inert mass, mounted on four elastic beams. Dimensions of beams for both sensitive elements are the same. The thickness is 10 μm , the width is 100 μm . The length of the beam for low range acceleration is 500 μm . The length of the beam for high range acceleration is 50 μm . In each of the measured ranges, the change in acceleration and the respective output voltage is 5 orders of magnitude.

Акселерометры – устройства измерения ускорения, находят очень широкое применение в таких сферах как транспорт, авиация, космическая техника. Выпускаемые промышленностью акселерометры отличаются по принципу действия, диапазону измерения ускорений, массе, габаритам, цене. Микроэлектронные акселерометры на основе кремниевых структур с резисторными или емкостными чувствительными элементами отличаются малыми габаритами, низкой потребляемой мощностью, высокой технологичностью и воспроизводимостью характеристик. Значения измеряемых ускорений принято указывать в единицах или долях ускорения свободного падения g . Динамический диапазон измеряемых ускорений выпускаемых акселерометров не превышает 10^6 [1].

Целью работы является расчёт конструкции акселерометра, способного работать в диапазоне измеряемых ускорений от $10^{-6}g$ до 10^4g .

Достижение поставленной цели предлагается путем размещения на одной подложке двух изолированных друг от друга чувствительных элементов, каждый из которых работает в своем диапазоне. Оба элемента имеют одинаковую конструкцию емкостного типа, представленную на рисунке 1. Емкостный акселерометр представляет собой две стационар-

ные пластины (электроды) и закрепленную между ними на упругих балках третью пластину (инерционную массу), способную перемещаться под действием ускорения. Емкостные чувствительные элементы характеризуются высокой линейностью передаточной характеристики, низким порогом чувствительности, простотой изготовления, широким диапазоном рабочих температур и повышенной радиационной стойкостью. К их недостаткам можно отнести относительно большие габаритные размеры в сравнение с тензорезисторными элементами.

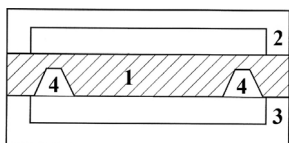


Рис. 1. Чувствительный элемент емкостного типа:
1 – инерционная масса; 2 – верхняя крышка;
3 – основание; области упругих балок

Предложена конструкция, в которой инерционная масса закреплена на четырех упругих балках, расположенных в середине каждой стороны. На основании расчета зависимости изменения емкости от размеров инерционной массы, а также размеров упругих балок, определены зависимости изменения емкости от величины измеряемого ускорения. Ширина и толщина балок для обоих диапазонов ускорения одинакова: 100 мкм и 10 мкм соответственно. При длине 500 мкм для диапазона ускорений ($10^{-6} \div 10^{-1}$)g изменение емкости составляет $\Delta C = (3,5 \times 10^{-6} \div 0,5)\%$. А при длине балки 50 мкм диапазон измеряемых ускорений составляет ($10^{-1} \div 10^4$)g, а изменение емкости составляет $\Delta C = (3 \times 10^{-5} \div 3)\%$. Выходное напряжение, снимаемое с датчика, пропорционально изменению емкости, следовательно изменяется в тех же пределах пяти порядков. Для современных интегральных схем обработки сигналов эти измерения не представляют сложности.

Предложена конструкция акселерометра, состоящая из двух чувствительных элементов, расположенных на одном кристалле. Размер чувствительных элементов $0,46 \times 1,46 \text{ мм}^2$; толщина и ширина упругих балок $10 \times 100 \text{ мкм}^2$; длина балок низкого диапазона ускорений 500 мкм, а высокого диапазона ускорений 50 мкм. Габаритные размеры акселерометра $6,4 \times 5,5 \times 1,2 \text{ мм}^3$. Для обоих чувствительных элементов изменение ускорения и соответствующего выходного напряжения в разных измеряемых диапазонах составляет 5 порядков, а в совокупности 10 порядков. Переключение с одного диапазона измерений на другой легко реализуется с помощью микропроцессорной схемы управления.

Литература

1. Веселов Д.С. и др. Конструктивно-технологические характеристики датчиков ускорения на основе МЭМС – технологий. // Датчики и системы. 2012. № 11, с. 68-77.

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПОЛИАНИЛИНОВЫХ ПЛЕНОК
НА $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

*А.В. Кешин, *В.В. Жилинский, И.М. Жарский*

Белорусский государственный технологический университет,
Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а,
e-mail: zhilinski@yandex.ru

**ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS AND ELECTRO-OPTICAL PROPERTIES
OF POLYANILINE FILMS ON $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ FOR OPTOELECTRONICS DEVICES**

*A.V. Keshin, *V.V. Zhyllinski, I.M. Zharski*

Belarusian State Technological University, Republic of Belarus,
220006, Minsk, Sverdlova Str., 13a, e-mail: zhilinski@yandex.ru

The technology of electrochemical deposition of polyethylene films on semiconductor surfaces has been studied. This technology allows you to receive various forms of polyaniline and it can be used to create modern touch devices, organic light emitting diodes, solar cells, "smart" glasses and orienting liquid crystal matrix coatings. The polyaniline samples synthesizing on ITO possess light transmission factor of 65% and conductivity of 30 Ohms per square.

Полианилин, как и неорганические полупроводники, может обратимо и контролируемо менять свойства при внешнем воздействии, либо под действием слабых электрических полей. Это означает, что ПАН способен играть роль триггера, а также благодаря электрической проводимости может быть использован в гибких электронных устройствах, включая гибкие дисплеи. [1, 2]

Распространенными способами получения ПАН являются химическая и электрохимическая полимеризация. Электропроводящий полианилин синтезируют электрохимическим методами в кислой среде путем окислительной полимеризацией мономера.

В настоящей работе для формирования полимерной структуры ПАН использовалась методика электрохимического окисления анилина на поверхности смешанного оксида индия-олова (ИТО). Формирование тонких слоев ПАН происходило при поенциодинамическом циклировании потенциала ИТО-электрода в области $-0,6$ до $1,0$ В (относительно насыщенного хлорид-серебряного электрода) при скорости развертки потенциала $0,05$ В/с. Осаждение пленок ПАН осуществляли из электролита состава,

моль/дм³: C₆H₅NH₂ – 0,3; H₂SO₄ – 0,5. В качестве противоэлектрода использовали платиновую фольгу.

На циклической вольтамперной кривой (рис. 1) отчетливо видно 4 характерных пика в анодной области, каждый из которых характеризует отдельную стадию процесса образования ПАН.

Первичная полимеризация мономера начинается с ростом потенциала в первой половине пика 1 с образованием лейкоэмеральдина и последующим переходом в форму протоэмеральдина.

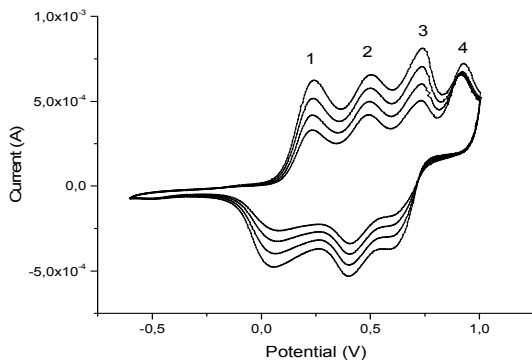


Рис. 1. Циклическая вольтамперограмма для ПТО-электрода, полученная в 0,3М C₆H₅NH₂ и 0,5 М H₂SO₄ при скорости развертки потенциала 0,05 В/с

Далее по мере роста приложенного потенциала на пике 2 происходит дальнейшее, более полное окисление протоэмеральдина до протонированного эмиральдина. Дальнейшее окисление протонированного эмиральдина происходит на пике 3, что приводит к образованию частично протонированного нигранилина.

Наконец, на пике 4 происходит конечное окисление и депротонирование нигранилина, с образованием полностью окисленного пернигранилина.

Таким образом, разработанная технология электрохимического осаждения полианилиновых пленок на полупроводниковые поверхности позволяет осуществлять получение различных форм полианилина и может использоваться для создания современных сенсорных устройств, органических светодиодов, солнечных элементов и качестве ориентирующих покрытий жидкокристаллических матриц.

Литература

1. Langer J. Unusual properties of the aniline black: does the superconductivity exist at room temperature // Solid State Commun. - 1978. - Vol. 26. - № 11. - P. 839-844.
2. Bhadra S. Progress in preparation, processing and applications of polyaniline / Bhadra S., Khashtgir D., Singha NK, Lee JH // Prog. Polym. Sci. - 2009. - Vol. 34. - № 8. - P. 783-810.

К ВОПРОСУ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КОВАЛЕНТНЫХ КОМПЛЕКСОВ CL-20

**К.П. Катин, М.М. Маслов, М.К. Борисова, Р.В. Рыжук, Н.И. Каргин*

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

ON THE STABILITY OF CL-20 COVALENT COMPLEXES

**K.P. Katin, M.M. Maslov, M.K. Borisova, R.V. Ryzhuk, N.I. Kargin*

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

Ensembles of CL-20 structures with different types of intermolecular bonds have been studied theoretically. The stability of such low-dimensional nanosystems has been investigated and the heights of potential barriers preventing their decomposition or isomerization have been determined by means of quantum-mechanical calculations based on the density functional theory and nonorthogonal tight-binding model. It has been established that CL-20 based structures are characterized by sufficiently high stability, which suggests the theoretical possibility of further creation of covalent crystals. Some electronic properties of these systems are also discussed.

Представленные в настоящей работе результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о принципиальной возможности формирования ковалентных связей между отдельными наносистемами CL-20, что позволяет предположить о существовании трехмерных ковалентных кристаллов на их основе. На примере димера и тримеров (прямого и инвертированного), связанных посредством CH_2 молекулярных мостиков (рис. 1), продемонстрирована высокая термодинамическая устойчивость структур из молекул CL-20.

Расчет структурных и энергетических характеристик, частотного спектра, оптимизация геометрии и поиск каналов распада/изомеризации молекулы CL-20 и структур на его основе проводились с помощью программного комплекса GAMESS [1] в рамках теории функционала плотности (DFT) с гибридным обменно-корреляционным функционалом B3LYP и базисом 6-31G(d), а также с использованием специально разработанной нами для систем H-C-N-O неортогональной модели сильной связи (NTBM) [2]. Найденные высоты энергетических барьеров, препятствующих распаду димера и тримеров, позволяют оценить их времена жизни при различных температурах. Так, при комнатной температуре их время жизни составляет ~ 100 нс, а при температуре кипения жидкого

азота время жизни таких систем принимает макроскопическое значение. Однако более удачный подбор “ковалентных мостиков” в дальнейшем, скорее всего, позволит улучшить термокинетические характеристики низкоразмерных структур на основе CL-20. Отметим, что основным механизмом термического распада ковалентных димера и тримеров при этом является не отрыв нитрогруппы или деформация углеродно-азотного каркаса (как в изолированном кластере CL-20), а разрыв межкластерных связей N–N или C–N связей.



Рис. 1. Тримеры, построенные на основе молекул CL-20, связанные посредством CH_2 функциональных групп: прямой (слева) и инвертированный (справа)

Таблица 1

**Энергии связи и НОМО-LUMO щели наноструктур,
построенных из CL-20 единиц**

Тип структуры	Энергия связи (а.е.)	НОМО-LUMO щель (эВ)
CL-20	-1790.3432914749	5.711
$(\text{CL-20})_2$	-2839.2867483009	4.854
$(\text{CL-20})_3$ прямой	-3888.2176912844	4.236
$(\text{CL-20})_3$ инвертированный	-3888.2172052621	4.151

Как видно из табл. 1 термодинамическая устойчивость квазиодномерных систем, построенных из CL-20 единиц, возрастает с ростом числа фрагментов. При этом НОМО-LUMO щель уменьшается. Таким образом, выбор молекулярных «ковалентных мостиков» позволит не только увеличить термодинамическую устойчивость, но и настроить электронные характеристики систем под конкретные задачи, что окажется полезным для приложений наноэлектроники. Мы надеемся, что настоящая работа будет способствовать проведению дальнейших экспериментальных и теоретических исследований физико-химических свойств кристаллических соединений на основе молекул CL-20.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (грант № МК-7410.2016.2).

Литература

1. M.W. Schmidt et al., J. Comput. Chem. **14**, 1347 (1993).
2. M.M. Maslov, A.I. Podlivaev, K.P. Katin, Mol. Simul. **42**, 305 (2016).

**ВЛИЯНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ КУЛОНОВСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
НА ЗАВИСИМОСТЬ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

**А.Ю. Саунина, В.Р. Никитенко*

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

**EFFECT OF MICROSCOPIC COULOMB INTERACTIONS
ON CONCENTRATION DEPENDENCE OF MOBILITY
OF CHARGE CARRIERS IN ORGANIC MATERIALS**

**A.Yu. Saunina, V.R. Nikitenko*

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

The filling of deep states is considered usually to be the reason of increase of the mobility of disordered organic materials with increasing concentration. However, at moderate concentrations the effect of microscopic Coulomb interactions (MCI) could be significant, because these interactions can reduce the activation energy of a hop. It is shown, that MCI results in significant additional increase of mobility along with concentration, in addition to the effect of the filling of deep states. The results are in qualitative agreement with existing theoretical and experimental studies.

В последние годы значительное внимание уделяется зависимости подвижности в носителей заряда в органических полупроводниках от концентрации носителей, в связи с применением данных материалов, а тонкоплёночных транзисторах и других элементах электроники. Обычно считается, что причиной роста подвижности в неупорядоченных органических материалах с ростом концентрации является заполнение глубоких состояний. Однако, при умеренных концентрациях значимым может быть также влияние микроскопических кулоновских взаимодействий (МКВ) носителей заряда, т.к. кулоновское отталкивание может уменьшить энергию активации прыжка. В настоящей работе получена функция распределения $\Phi(F_0, c)$ модуля кулоновского поля F_0 , созданного ближайшим соседним зарядом. Зависимость подвижности от концентрации вычисляется путём усреднения «локальной» подвижности $\mu(F_0, c)$, вычисленной для определённой напряжённости микроскопического поля F_0 , в предельном случае слабого внешнего поля, когда зависимостью подвижности от этого поля можно пренебречь:

$$\mu(c) = \int_0^{\infty} dF_0 \Phi(F_0, c) \mu(F_0, c). \quad (1)$$

Локальная подвижность носителей, $\mu(F_0, c)$ рассчитывается на основе теории протекания [1] с применением концепции транспортного уровня [2]:

$$\mu(c) = (\mu_0/c) \exp\left[-(E_C - E_F(c))/kT\right], \quad (2)$$

где c – относительная концентрация носителей, E_F – квазиуровень Ферми, E_C – транспортный уровень, зависящий от поля F_0 [3].

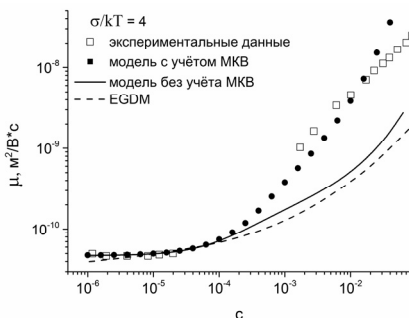


Рис. 1. Зависимость подвижности от концентрации носителей в слабом внешнем поле для параметра беспорядка $\sigma/kT = 4$. Пустые символы – экспериментальные данные работы [4]. Показаны результаты расчёта по представленной модели с учётом (символы) и без учёта (сплошная линия) МКВ, пунктир – результаты расширенной модели гауссова беспорядка (EGDM) [5]

Показано, что при наиболее разумных значениях параметров именно модель МКВ лучше согласуется с известными экспериментальными данными [4], чем широко известная расширенная модель гауссова беспорядка [5], которая учитывает только заполнение глубоких состояний. Результаты находятся в качественном согласии с существующими теоретическими и экспериментальными исследованиями. Таким образом, данная работа показывает существенное влияние МКВ на зависимость подвижности от концентрации, а также применимость концепции транспортного уровня к аналитическому моделированию этой зависимости.

Литература

1. V. I. Shklovskii and A. L. Efros, *Electronic Properties of Doped Semiconductors* (Springer, Berlin, 1984).
2. V. R. Nikitenko and M. N. Strikhanov, *Journal of Applied Physics* **115**, 073704 (2014).
3. V. R. Nikitenko and A. Y. Saunina, *Semiconductors* **49**, 1348 (2015).
4. C. Tanase, P. W. M. Blom, D. M. de Leeuw, and E. J. Meijer, *Physica Status Solidi a-Applied Research* **201**, 1236 (2004).
5. W. F. Pasveer, J. Cottaar, C. Tanase, R. Coehoorn, P. A. Bobbert, P. W. M. Blom, D. M. de Leeuw, and M. A. J. Michels, *Physical Review Letters* **94**, 206601 (2005).

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КВАЗИРАВНОВЕСНОГО ТРАНСПОРТА
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ
ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА CELIV**

*В.Р. Никитенко, *М.М. Амракулов*

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

**THEORETICAL ANALYSIS OF QUASI-EQUILIBRIUM TRANSPORT
OF CHARGE CARRIERS IN DISORDERED ORGANIC MATERIALS
UNDER CONDITIONS OF CELIV EXPERIMENT**

*V.R. Nikitenko, *M.M. Amrakulov*

National 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 in conditions of CELIV (Charge Extraction by Linearly Increasing Voltage) experiment have been founded in quasi-equilibrium transport regime. It is shown that anomalously large value of diffusion coefficient (field-stimulated diffusion) results in significant decrease of the ratio of maximal current time to the transient time, if disorder is rather strong. This ratio is also founded analytically, and condition of applicability of conventional theory of CELIV (neglecting diffusion) is established.

Применения органических материалов в электронике весьма разнообразны – полевые транзисторы, светоизлучающие диоды, устройства памяти, лазеры и т.д. Транспорт носителей заряда, важной характеристикой которого является подвижность, является одним из базовых физических процессов, которые определяют функционирование органической электроники. Одним из перспективных методов измерения подвижности в тонких слоях (порядка 100 нм, что типично для органической электроники), является метод CELIV (Charge Extraction by Linearly Increasing Voltage) [1]. В условиях CELIV к образцу прикладываются импульсы линейно возрастающего напряжения, и наблюдается переходный ток, вызванный экстракцией носителей заряда из образца. Согласно исходной теории, подвижность носителей заряда можно найти их простого соотношения между временем максимума переходного тока и временем пролета [1, 2]. Надо заметить, что даже в квазиравновесном режиме переноса, когда подвижность постоянна, в случае сильного беспорядка транспорт носителей в нестационарных условиях характеризуется аномально

большим коэффициентом диффузии (т.н. стимулированная полем диффузия, СПД [3, 4]). В то же время, обычная теория CELIV [1, 2] не учитывает диффузию, что не оправдано в случае достаточно большого энергетического беспорядка, когда коэффициент СПД намного превышает коэффициент обычной диффузии.

Известно, что транспорт носителей заряда в органических материалах является прыжковым [5], однако для его описания можно применять формализм модели многократного захвата и освобождения носителей на основе концепции транспортного уровня [4]. Используя данный формализм, получено и аналитически решено уравнение для пространственно-неоднородной концентрации носителей, зависящей от времени, которое учитывает СПД в случае, когда электрическое поле растёт со временем по линейному закону. Также аналитически получена зависимость переходного тока от времени в условиях эксперимента CELIV с учётом СПД. Результаты вычислений показывают, что с ростом энергетического беспорядка не только появляется широкий «хвост» сигнала переходного тока при временах, превышающих время пролёта носителей, но и существенно уменьшается отношение времени максимума тока ко времени пролёта. Найдены аналитические зависимости отношения данных времён от единственного безразмерного параметра, характеризующего материал. Определены условия, при которых справедлива известная теория CELIV (без учёта диффузии) [1, 2]. Результат позволяет корректно определить время пролёта и, следовательно, подвижность по данным CELIV в случае, когда сигнал переходного тока имеет сильно асимметричную форму (которая часто наблюдается в эксперименте CELIV и не согласуется с теорией, которая не учитывает стимулированную полем диффузию).

Литература

1. G. Juška, K. Arlauskas, and M. Vilinas, Phys. Rev. Lett **84**, 4946 (2000).
2. A. J. Mozer, N. S. Sariciftci, L. Lutsen, D. Vanderzande, R. Österbacka, M. Westerling, and G. Juška, Appl. Phys. Lett. **86**, 112104 (2005).
3. Rudenko A I and Arkhipov V I 1982 Philos. Mag. B 45 177.
4. V.R. Nikitenko, H. von Seggern, H. Bässler. J. Phys.: Condens. Matter, **19**, 136210, 15 pp (2007).
5. H. Bässler, Phys. Status Solidi B 175, 15 (1993).

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

– А –

Абакумов А.М., 143
Авакянц Л.П., 129
Аверьянов Д.В., 87
Алексамян А.А., 67
Алешин А.Н., 123
Алещенко Ю.А., 12
Амракулов М.М., 153
Арапов Ю.Г., 25
Аронзон Б.А., 27
Арутюнян С.С., 45
Асланян А.Э., 129

– Б –

Бабак Л.И., 23
Бакаров А.К., 14
Бакун А.Д., 59
Безотосный В.В., 135
Богданов Е.В., 71
Богомазова Н.В., 103
Боков П.Ю., 129
Большакова И.А., 139, 141
Бондаренко А.В., 109
Бондаренко В.П., 10, 99
Борисова М.К., 149
Бугаев А.С., 73
Буряков А.М., 31

– В –

Вавилова Е.А., 83
Валишева Н.А., 131
Васильев А.В., 31, 87, 89, 139, 141
Васильев Р.Б., 143
Васильева О.В., 59
Васильевский И.С., 16, 21, 25, 75,
139, 141
Васильченко А.А., 29

Верховцева А.В., 33
Веселов Д.С., 61, 121, 145
Виниченко А.Н., 21, 25, 75, 139
Волков В.В., 35, 129
Воронов Ю.А., 61, 121, 145
Воропаев К.О., 137

– Г –

Гайбура А.В., 61
Гайдук П.И., 91
Галиев Г.Б., 31, 89
Галиев Р.Р., 73, 133
Гамкредидзе С.А., 45
Гаськова А.М., 143
Герасимов А.О., 43
Гергель В.А., 33
Гиллинский А.М., 131
Гирел К.В., 111
Голяка Р.Л., 141
Горох Г.Г., 47, 77, 97, 101, 103
Горшкова Н.М., 33
Грехов М.М., 89
Грищенко Ю.В., 83, 85
Громов Д.В., 125
Груздов В.В., 41, 43, 127
Гудина С.В., 25
Гуляев Д.В., 14
Гусев А.С., 93, 115
Гусев М.Е., 19, 127

– Д –

Дмитриев Д.В., 131
Добуш И.М., 23
Долгий А.Л., 99
Дроздов К.А., 143
Дубровский В.Г., 81

– Е –

Егоркин В.И., 35, 37
Езубченко И.С., 83, 85
Енишерлова К.Л., 19
Еремин И.С., 75
Еримеев Г.А., 79

– Ж –

Жарский И.М., 147
Желаннов А.В., 57
Жилинский В.В., 103, 147
Жуков А.Е., 133
Журавлёв К.С., 14, 37, 131

– З –

Заварин Е.Е., 35
Занавескин М.Л., 83, 85
Захарченко Р.В., 63, 119
Захлабаева А.И., 103
Зебрев Г.И., 63, 65
Земляков В.Е., 35, 37
Зотов А.О., 117

– И –

Иванова Н.Е., 45
Иешкин А.Е., 115
Ионов А.С., 137
Ирха В.А., 79

– К –

Кагирина К.А., 45
Казачков И.П., 67
Калошин М.М., 113
Каратеев И.А., 87
Каратеева К.Г., 87
Каргин Н.И., 109
Каргин Н.И., 115
Каргин Н.И., 119

Каргин Н.И., 139
Каргин Н.И., 141
Каргин Н.И., 21, 39, 63, 75, 93, 149
Карузский А.Л., 67
Катин К.П., 149
Кешин А.В., 147
Клековкин А.В., 12, 53
Климов Е.А., 31, 89
Клочков А.Н., 31, 89
Ковальчук Н.Г., 105, 107, 109, 111
Коган Л.М., 129
Кокотов А.А., 23
Коленцова О.С., 75, 89
Колковский Ю.В., 19, 41
Комиссаров И.В., 105, 107, 109, 111
Концевой Ю.А., 19
Королик О.В., 111
Корякин А.А., 81
Кость Я.Я., 139, 141
Кривобок В.В., 12
Крохин О.Н., 135
Крылов И.В., 143
Кубашевский Е.П., 71
Кузнецов А.Л., 33
Кульбачинский В.А., 27
Кулямина Д.А., 39

– Л –

Лабунев В.А., 47, 105, 107, 109, 111
Лаврентьев К.К., 55
Лаврухин Д.В., 45
Лебедев С.С., 59
Лозовенко А.А., 101, 97
Лундин В.В., 35
Лунина М.Л., 69
Ляхова Н.Н., 47

– М –

Майборода И.О., 83, 85
Малин Т.В., 37
Мальцев П.П., 33, 125

Мансуров В.Г., 37
Маслов М.М., 149
Масол И.В., 47
Матющенко И.А., 113
Мехия А.Б., 12
Минина Н.Я., 71
Минкин В.С., 33
Миннебаев В.М., 41, 43
Митягин Ю.А., 67
Мишина Е.Д., 31
Мороз А.П., 139
Мосин Д.А., 105
Муратов А.В., 12
Мурзин В.Н., 67

– Н –

Неверов В.Н., 25
Нехаева Е.И., 27
Нигериш К.А., 109
Никитенко В.Р., 151, 153
Никитов С.А., 33
Никифоров А.Ю., 125
Николаев А.Е., 35
Новиков В.А., 49

– О –

Обухов И.А., 101
Овешников Л.Н., 27
Олещенко В.А., 135
Осинский В.И., 47, 97

– П –

Павлов А.Ю., 53, 133
Павлов В.Ю., 53
Павлова Е.П., 115
Павловский В.В., 33
Парнес Я.М., 37

Парфёнов О.Е., 87
Пащенко А.С., 95
Певцов В.Ф., 135
Певцов Е.Ф., 127
Перевалов А.А., 117
Перевезенцев А.В., 43
Пересторонин А.В., 67
Плиговка А.Н., 77
Пономарев Д.С., 133
Пономарев Д.С., 73
Попов Ю.М., 135
Пресняков М.Ю., 83
Прищета С.Л., 105, 107, 111
Протасов Д.Ю., 14
Пруцков Г.В., 87
Пушкарев С.С., 31, 89

– Р –

Рубан О.А., 123
Румянцова М.Н., 143
Русак Т.Ф., 19
Ръжук Р.В., 39, 109, 119, 149
Рындя С.М., 115

– С –

Савельев А.П., 25
Сагунова И.В., 117
Сальников А.С., 23
Саунина А.Ю., 151
Сафаралиев Г.К., 93
Сахаров А.В., 35
Селезнев Б.И., 57, 137
Сибирев, Н.В., 81
Сибирмовский Ю.Д., 75
Сиглова Н.В., 59, 93
Слаповский Д.Н., 53, 133
Смирнова Е.А., 101
Сторчак В.Г., 87
Стриханов М.Н., 139, 141

Султанов А.О., 93
Суховий Н.О., 47

– Т –

Талденков А.Н., 87
Телец В.А., 125
Тиванов М.С., 111
Токмачёв А.М., 87
Томош К.Н., 133
Торопов А.И., 14, 131
Торхов Н.А., 23, 49, 51
Трунькин И.Н., 89
Туркин А.Н., 129

– У –

Усов С.О., 35
Устинов В.М., 35
Устюгова А.В., 63

– Ф –

Федоров Д.Г., 57
Федоров Ю.В., 53
Фельшерук А.В., 107
Фигуров В.С., 125
Филатова Д.Г., 143
Филимонова И.Д., 49

– Х –

Хабибуллин Р.А., 33, 73, 133
Ходорович В.Г., 127

– Ц –

Цацульников А.Ф., 35
Цховребов А.М., 67
Цырлин Г.Э., 133

– Ч –

Чеботарев С.Н., 79
Червяков А.В., 129
Чешев Е.А., 135
Чижов А.С., 143
Чистохин И.Б., 131

– Ш –

Шеерман Ф.И., 23
Шелушинина Н.Г., 25
Шмелёв С.С., 67
Шостаченко С.А., 63, 109, 119
Шурыгин Ф.М., 139, 141

– Щ –

Щаврук Н.В., 133

– Ю –

Юзеева Н.А., 123
Юнович А.Э., 129

– Я –

Якунин М.В., 25
Яценко А.Н., 79
Ячменев А.Э., 73

– G –

Grigaliūnas V., 111

– K –

Kuech T., 139
Kumada M., 141

–L –

Lazauskas A., 105, 111

–M –

Meškiniš Š., 111

–R –

Rogacki K., 139

–T –

Tamulevičius S., 105, 111

Tamulevičius T., 111

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

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

25 мая 2016 года

СБОРНИК ТРУДОВ

Подписано в печать 11.05.2016. Формат 60×84 1/16.

Печ.л. 10,0. Тираж 150 экз. Заказ № 62.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ.*

115409, Москва, Каширское ш., 31