



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

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

25–26 мая 2022 года

МОСКВА

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

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

25–26 мая 2022 года

СБОРНИК ТРУДОВ

Москва

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

XIII International Conference
on Physics and Technology
of Nanoheterostructure Microwave Electronics

May 25–26, 2022

Conference Proceedings

Moscow

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

Мокеровские чтения. 13-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 25–26 мая 2022 года.: сборник трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – 172 с.

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

Материалы докладов подготовлены сотрудниками различных учреждений: институтов РАН, представителями производственных организаций и университетов и отражают современное состояние и пути развития проблем СВЧ-твердотельной электроники на основе наноразмерных гетероструктур и других новых функциональных материалов. Тезисы докладов размещены в тематических секциях в соответствии с программой конференции.

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

Сайты конференции:

<https://mokerov.mephi.ru/> / www.mokerov.ru (раздел «Конференции»).

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

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

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

Материалы получены до 1 апреля 2022 г. Сборник трудов издается в авторской редакции.

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

The Conference unites leading scientists and technologists working on the wide range of problems in the field of heterostructure microwave electronics and related topics. The Conference speakers represent various organizations: the Institutes of the Russian Academy of Sciences, the Industrial institutions, the Universities. The presentations reflect the modern state and development of microwave electronics based on nanoheterostructures and other advanced functional materials.

Abstracts are combined into thematic sections corresponding to the conference program. The sections are: Fundamentals of nanoheterostructure microwave electronics; Semiconductor microwave devices: fabrication, technology and performance Advanced materials, Heterostructures and superlattices, two-dimensional, one-dimensional and zero-dimensional structures; Functional electronics and Optoelectronics, Terahertz photonics.

Conference sites:

<https://mokerov.mephi.ru> / www.mokerov.ru

National Research Nuclear University “MEPhI”

www.mephi.ru

Education and Science Support Foundation named after Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor V.G. Mokerov

www.mokerov.ru

V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS

www.isvch.ru

Proceedings were received before 01.04.2022.

Proceedings are published as received with no editing.

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРНОЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

ПРИЩЕПА С.Л., ДАНИЛЮК А.Л., ТРАФИМЕНКО А.Г. Температурная зависимость эффекта Холла в кремнии, легированном сурьмой.....	12
МАЛИН Т.В., МИЛАХИН Д.С., МАНСУРОВ В.Г., ВДОВИН В.И., КОЖУХОВ А.С., ЛОШКАРЁВ И.Д., АЛЕКСАНДРОВ И.А., ПРОТАСОВ Д.Ю., ЖУРАВЛЁВ К.С. Сравнение электрофизических параметров 2DEG в гетероструктурах AlGaIn/GaN, выращенных методом NH ₃ -MBE на сапфировых и кремниевых подложках	14
ПРОТАСОВ Д.Ю., БАКАРОВ А.К., ЖУРАВЛЕВ К.С. Эффект Холла в сильных электрических полях на гетероструктурах DA-pHEMT	16
БОГДАНОВ С.А., БАКАРОВ А.К., ЖУРАВЛЁВ К.С., КАРПОВ С.Н., ЛАПИН В.Г., ЛУКАШИН В.М., ПАШКОВСКИЙ А.Б., ПРОТАСОВ Д.Н., РОГАЧЁВ И.А., ТЕРЁШКИН Е.В. Цифровые потенциальные барьеры в обращенных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием	18
РОДИОНОВ Д.А., ЗАГОРОДНЕВ И.В. О плазменных резонансах в проводящем диске: роль эффектов запаздывания.....	20
КЛОЧКОВ А.Н., ЫСКАКОВ А., ВИНИЧЕНКО А.Н., САФОНОВ Д.А., БУЛАВИН М.В., ГАЛУШКО А.В., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С. Влияние нейтронного облучения на оптические свойства легированных квантовых ям.....	22

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА: ПРОИЗВОДСТВО, ТЕХНОЛОГИИ И СВОЙСТВА

ЦУНВАЗА Д.М., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ГОРЕЛОВ А.А., РЫЖУК Р.В., КАРГИН Н.И. Проектирование моделей пассивных элементов СВЧ МИС на основе GaAs	24
САЛЬНИКОВ А.С., ДОБУШ И.М., КАЛЕНТЬЕВ А.А., ГОРЯИНОВ А.Е. Концепция цифрового дизайн-центра СВЧ микроэлектроники для систем беспроводной связи	26
СМИРНОВ Ю.Ю., ДРАГУТЬ М.В. Вжигание платины в технологии затворов GaAs pHEMT транзисторов.....	30

ВАСИЛЬЕВ П.С., ДРАГУТЬ М.В., ЛУКИН В.А. Разработка процесса плазмохимического травления кремния в технологии 3D МДП конденсаторов.....	32
ОКАЗОВ А.К., ДРАГУТЬ М.В. Технология изготовления керамических корпусов типа QFN для СВЧ МИС	34
ФЕДОРОВ Д.Г., БОЧЕНКОВ Г.М., ЖЕЛАННОВ А.В., СЕЛЕЗНЕВ Б.И. Характеристики гетероэпитаксиальных структур $\text{InGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$, имплантированных ионами азота	36
ДРАГУТЬ М.В., СЕЛЕЗНЕВ Б.И., МИШАРИН Д.М. Технология и параметры интегрального pHEMT транзистора на основе гетероструктур GaAs X и Ku диапазонов.....	38
ГРЕБЕННИКОВ В.А., ЖЕЛАННОВ А.В., СЕЛЕЗНЕВ Б.И. Селективное плазмохимическое травление в индуктивно-связанной плазме гетероэпитаксиальной структуры GaN/AlGaIn при формировании нормально-закрытого транзистора	40
СОБОЛЕВ А.С., МАЙТАМА М.А., КЛИМОВ Е.А., ПАВЛОВ А.Ю., ПОНОМАРЕВ Д.С., ХАБИБУЛЛИН Р.А. СВЧ характеристика резонансно-туннельных диодов на основе GaAs/AlAs	42
АЛЁШИН А.Н., ЗЕНЧЕНКО Н.В., РУБАН О.А. Особенности формирования токопроводящих каналов в мемристорах на основе селенида германия	44
АВРАМЧУК А.В., ДАВЛЯТШИНА А.Р., ТЕРТЫШНАЯ Ю.А., ВИНИЧЕНКО А.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С. Особенности технологии планаризации гребенчатых структур радиодифракционных компонентов.....	46
ГРИШАКОВ К.С. Моделирование и оптимизация резонансно-туннельных диодов на основе нитридов галлия	48
ЭТРЕКОВА М.О., ЛИТВИНОВ А.В., САМОТАЕВ Н.Н., КАЗИЕВ А.В., ГОРЕВОЙ А.Т. Формирование электродов газочувствительных МДП-сенсоров: сравнение методов лазерного и магнетронного распыления.....	50
ЛОКОТКО В.В., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., КАРГИН Н.И. Высокоточное моделирование 0.15 мкм MHEMT $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$ транзистора	52
ТУЧКОВСКИЙ А.К., ЛАБУНОВ В.А., КАШКО И.А., ФИЛИППОВ В.В. Использование тонких слоев углеродсодержащих материалов для улучшения транспортных свойств границы перовскита MAPbI_3 и оксида никеля	54

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

ВАСИЛЬЧЕНКО А.А.

Стабильность квантового холловского состояния в двойных квантовых ямах при $\nu = 1$	56
ГУДИНА С.В., АРАПОВ Ю.Г., НЕВЕРОВ В.Н., САВЕЛЬЕВ А.П., ШЕЛУШИНИНА Н.Г., ЯКУНИН М.В., ЗВОНКОВ Б.Н.	
Слабая локализация и время фазовой когерентности в структурах InGaAs/GaAs с двойными сильно-связанными квантовыми ямами.....	58
БАГЛОВ А.В., ХОРОШКО Л.С.	
Влияние понижения размерности на зонную структуру дисульфида рения.....	60
СМИРНОВА М.О., АРЗАМАСЦЕВА Д.М., ГУСЕВ А.С., КАРГИН Н.И., КАЛОШИН М.М., САЛКАЗАНОВ А.Т., ТИМОФЕЕВ А.А., РАНОВ А.Б.	
Формирование центров окраски азот-вакансия в эпитаксиальной алмазной пленке методом низкоэнергетического электронного облучения.....	62
СИБИРМОВСКИЙ Ю.Д., ГРИШАКОВ К.С., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С.	
Моделирование оптических спектров квантовых ям и сверхрешеток с помощью нестационарного уравнения Шредингера	64
БОРИСЕНКО Д.П., ГУСЕВ А.С., КАРГИН Н.И., РЫЖУК Р.В., РЫНДЯ С.М., САФАРАЛИЕВ Г.К., СИГЛОВАЯ Н.В., СУЛТАНОВ А.О.	
Исследование электрофизических параметров гетероструктур 3C-SiC/Si	66

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА И НАНОМЕТРОЛОГИЯ НАНОСИСТЕМ ГЕТЕРОСТРУКТУР

ФЕДОСЕНКО В.С., ИДЖИ М.М., ЛОЗОВЕНКО А.А., ГОРОХ Г.Г.

Исследование нанокompозитов на основе сульфида кадмия и оксида титана	68
ПАЩЕНКО А.С., ДЕВИЦКИЙ О.В., ЛУНИН Л.С.	
Структурные свойства твердых растворов GaInAsBi, выращенных на подложках GaAs	70
МАЙДЭБУРА Я.Е., МАЛИН Т.В., ЖУРАВЛЕВ К.С.	
Прямой и обратный 2D $\leftrightarrow$ 3D переход при формировании квантовых точек GaN на поверхности AlN.....	72
ДМИТРИЕВ Д.В., КОЛОСОВСКИЙ Д.А., ТОРОПОВ А.И., ЖУРАВЛЕВ К.С.	
Механизмы удаления оксида с поверхности InP(001) в потоке As ₄	74
КОЛОСОВСКИЙ Д.А., ДМИТРИЕВ Д.В., ПОНОМАРЕВ С.А., ТОРОПОВ А.И., ЖУРАВЛЕВ К.С.	
Рост островков InAs на поверхности InP(001) при отжиге в потоке мышьяка.....	76

СВИТ К.А., ЗАРУБАНОВ А.А., ЖУРАВЛЕВ К.С.

Определение кристаллической структуры и асимметрии формы нанокристаллов CdS из тонкой структуры спектров поглощения рентгеновских лучей..... 78

ТРОФИМОВ А.А., НОВИКОВА А.А., МОЖАЕВА М.О., ГЛАДЫШЕВА К.А., ГОНЧАРОВ А.Е., КОСЯКОВА А.М.

Начальные этапы процессов полирования в производстве подложек соединения кадмий-цинк-теллур для выращивания гетероструктур кадмий-ртуть-теллур методом молекулярно-лучевой эпитаксии 80

ФРОЛОВ Н.Ю., КЛОКОВ А.Ю., ШАРКОВ А.И., ХМЕЛЬНИЦКИЙ Р.А.

Гиперзвуковая микроскопия заглублённых графитизированных слоёв в алмазе 82

САЛКАЗАНОВ А.Т., АРЗАМАСЦЕВА Д.М., ТАРЕЛКИН С.А.,

СМИРНОВА М.О., ГУСЕВ А.С., КАРГИН Н.И.

ОДМР комплекса NV – ^{13}C в гомоэпитаксиальном алмазном слое 84

АРЗАМАСЦЕВА Д.М., ГУСЕВ А.С., КАРГИН Н.И., САЛКАЗАНОВ А.Т., СМЕРНОВА М.О., ТАРЕЛКИН С.А.

Исследование особенностей формирования NV центров на различных кристаллографических плоскостях алмаза..... 86

САМОЛЫГА А.А., КЛОЧКОВ А.Н., ВИНИЧЕНКО А.Н., САФОНОВ Д.А.,

РЫНДЯ С.М., ТИМОФЕЕВ А.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С.

Пленки n-InAs, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на сапфире..... 88

ТЕРАГЕРЦОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА

АЛЕКСАНЯН А.А., КАРУЗСКИЙ А.Л., МИТЯГИН Ю.А.,

ПЕРЕСТОРНИН А.В., ЧЕРНЯЕВ А.П.

Статические эффекты в электродинамике сверхпроводников и терагерцовых РТД структур на основе GaAs/AlAs 90

ХАБИБУЛЛИН Р.А., АФОНЕНКО А.А., УШАКОВ Д.В., ПУШКАРЕВ С.С.,

ГАЛИЕВ Р.Р., ПОНОМАРЕВ Д.С., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С.,

КЛОЧКОВ А.Н., ВИНИЧЕНКО А.Н., ЛАДУГИН М.А., БАГАЕВ Т.А.,

МАРМАЛЮК А.А., МАРЕМЬЯНИН К.В., ГАВРИЛЕНКО В.И.

Двухфотонный дизайн для ТГц квантово-каскадных лазеров: от идеи до экспериментальной реализации..... 92

ПОНОМАРЕВ Д.С., ЛАВРУХИН Д.В., ЯЧМЕНЕВ А.Э.,

ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЗАЙЦЕВ К.И., СПЕКТОР И.Е., СКОРОБОГАТЫЙ М.

Системы многопиксельной терагерцовой визуализации на основе двумерных массивов фотопроводящих антенн 94

ПУШКАРЕВ С.С., ГАЛИЕВ Р.Р., ЦАВРУК Н.В., ДЮЖИКОВ И.Н.,

ПАВЛОВСКИЙ В.В., ВОЛКОВ О.Ю., ХАБИБУЛЛИН Р.А.

Эффективность модовой конверсии в 3.3 ТГц квантово-каскадном лазере..... 96

ДОЛГОВ А.К., ГАЛИЕВ Р.Р., ПУШКАРЕВ С.С., АФОНЕНКО А.А., УШАКОВ Д.В., ВОЛКОВ О.Ю., ПАВЛОВСКИЙ В.В., ДЮЖИКОВ И.Н., ХАБИБУЛЛИН Р.А.	
Исследование спектральных характеристик 2.2 ТГц квантово-каскадного лазера с двухсекционным резонатором в зависимости от температуры и тока	98
ЗЕНЧЕНКО Н.В., ЛАВРУХИН Д.В., ФРОЛОВ Т.В., КАТЫБА Г.М., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЗАЙЦЕВ К.И., ПОНОМАРЕВ Д.С.	
Локализация энергии световой накачки в оптико-терагерцовом преобразователе с использованием профилированных сапфировых волокон	100
НОМОЕВ С.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н.	
Разработка и изготовление фотопроводящей антенны с плазмонными золотыми наноостровками и наностержнями в ТГц области	102

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ХОРОШКО Л.С., БАГЛОВ А.В.	
Структурные свойства дисульфида и диселенида рения	104
ХОРОШКО Л.С., БАГЛОВ А.В., СВИТО И.А., КОРОЛИК О.В.	
Люминесцентные и структурные свойства титаната бария-европия	106
КОВАЛЬЧУК Н.Г., КОМИССАРОВ И.В., ДРОНИНА Е.А., ПРИЩЕПА С.Л.	
Легирование ХПО графена хлоридом железа (III)	108
ДРОНИНА Е.А., МИХАЛИК М.М., КОВАЛЬЧУК Н.Г., НИГЕРИШ К.А., ФЕЛЬДШЕРУК А.В., КОМИССАРОВ И.В.	
Исследование структуры ХПО графена перенесенного с поверхности медного катализатора на целевую подложку при помощи различных каркасов с последующей жидкофазной и термической обработкой	110
ГВОЗДОВСКИЙ Д.Ч.	
Оптические свойства графена по результатам АВ INITIO моделирования	112
СОКОЛОВ И.С., АВЕРЬЯНОВ Д.В., КАРАТЕЕВ И.А., ПАРФЁНОВ О.Е., ТАЛДЕНКОВ А.Н., ТОКМАЧЁВ А.М., СТОРЧАК В.Г.	
Электронные состояния в пленках гексагонального полиморфа SrSi_2	114
АВЕРЬЯНОВ Д.В., СОКОЛОВ И.С., КАРАТЕЕВ И.А., ТАЛДЕНКОВ А.Н., КОНДРАТЬЕВ О.А., ТОКМАЧЁВ А.М., ПАРФЁНОВ О.Е., СТОРЧАК В.Г.	
Двумерный ферромагнетизм поверхностных фаз Eu на германии	116
АВЕРЬЯНОВ Д.В., СОКОЛОВ И.С., КАРАТЕЕВ И.А., ТАЛДЕНКОВ А.Н., КОНДРАТЬЕВ О.А., ТОКМАЧЁВ А.М., ПАРФЁНОВ О.Е., КАЦ В.Н., ШЕЛУХИН Л.А., УСАЧЕВ П.А., ПАВЛОВ В.В., СТОРЧАК В.Г.	
Инициирование магнитной прецессии в эпитаксиальных пленках EuO путем фемтосекундной оптической ориентации спинов	118
ЛЕБЕДЕВ А.И.	
Спиновое расщепление в квазидвумерных структурах на основе CdS, CdSe, CdTe и GaAs	120

СЛУЧИНСКАЯ И.А., ЛЕБЕДЕВ А.И.

Возможность усиления перестраиваемости диэлектрической
проницаемости SrTiO_3 в электрическом поле путем его легирования
нецентральными атомами Fe 122

КУЛЯМИН П.А.

Электронные свойства графена, осажденного на диэлектрическую
подложку из дителлурида молибдена 124

КОЧАЕВ А.И., КАТИН К.П., МАСЛОВ М.М.

Точечные дефекты гетероструктуры борофен-графен: моделирование,
энергетические характеристики, пути стабилизации 126

ГРИШАКОВ К.С., ДЕГТЯРЕНКО Н.Н.

Точечные дефекты в твердом атомарном водороде под давлением
(DFT моделирование) 128

МЕРИНОВ В.Б., КАТИН К.П., МАСЛОВ М.М.

Энергетические и электронные характеристики германиевых призм 130

КАЛИКА Е.Б., КАТИН К.П., МАСЛОВ М.М.

Структурные, электронные и адсорбционные свойства
фторированных фуллеренов 132

ДОЛИНА Е.С., МАСЛОВ М.М., КАТИН К.П.

Термическая устойчивость графина-6,6,12 134

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОФОТОНИКА

ГУЛЯЕВ Д.В., КОЛОСОВСКИЙ Д.А., ДМИТРИЕВ Д.В.,

КОЛОСОВСКИЙ Е.А., ЖУРАВЛЕВ К.С.

InGaAlAs/InAlAs/InP гетероструктуры для электрооптического
модулятора на 1.55 мкм, полученные цифровой эпитаксией 136

ЖУРАВЛЕВ К.С., АРЫКОВ В.С., ЮНУСОВ И.В., СКОК Д.В.,

ЧИСТОХИН И.Б., АКСЕНОВ М.С., ГИЛИНСКИЙ А.М., ДМИТРИЕВ Д.В.

Гибридный скоростной фотоприемник на основе

InAlAs/InGaAs-фотодиода и трансимпедансного усилителя 138

ВОРОПАЕВ К.О., СЕЛЕЗНЕВ Б.И., ВОРОПАЕВА И.О.

Исследование расходимости излучения вил с длиной волны
генерации 1550 нм с различными размерами апертуры 140

ГУЛЬКИН Д.Н., ШОРОХОВ А.С., СНИГИРЁВ В.С., БЕССОНОВ В.О.,

ФЕДЯНИН А.А.

Сверхбыстрая полностью оптическая модуляция интенсивности
порядков дифракции на метаповерхности из арсенида галлия,
состоящей из ми-резонансных частиц 142

ИБРАГИМОВ А.А., СИТНЯНСКИЙ В.А., ЯГУДИН Д.Ф., ШОРОХОВ А.С.,

ФЕДЯНИН А.А.

Полностью оптический переключатель в цепочках кремниевых
наноантенн с применением материала с фазовым переходом 144

МАШАРОВ Н.Д., ИБРАГИМОВ А.А., ШОРОХОВ А.С., ФЕДЯНИН А.А. Электроиндуцированная модуляция света полупроводниковыми металлоповерхностями	146
СИТНЯНСКИЙ В.А., ГУЛЬКИН Д.Н., ШОРОХОВ А.С., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ФЕДЯНИН А.А. Полностью оптический модулятор на основе интегральных волноводных структур из арсенида галлия	148
ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ГОРЕЛОВ А.А., ЛОКОТКО В.В., САФОНОВ Д.А., КАРГИН Н.И. Сравнение СВЧ характеристик 0.15 МКМ-РНЕМТ транзисторов с дельта- и комбинированным легированием в режиме большого сигнала	150
ГОРЕЛОВ А.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., КАРГИН Н.И., РЫЖУК Р.В. Кроссплатформенный подход к моделированию электрооптического модулятора Маха-Цендера на платформе InP	154
ЗАЙКИН Д.О., ТИМОФЕЕВ А.А., КАРГИН Н.И. Формирование твердотельных оптических структур на поверхности алмаза для увеличения квантового выхода от источника одиночных фотонов	156
САУНИНА А.Ю., ТКАЧ А.А., АЛЕКСАНДРОВ А.Е., ЛЫПЕНКО Д.А., НИКИТЕНКО В.Р., НАБИЕВ И.Р., САМОХВАЛОВ П.С. К оптимизации светимости и эффективности светодиода с квантовыми точками: эксперимент и теоретическая модель	160
БУТАЕВ М.Р., КОЗЛОВСКИЙ В.И., СКАСЫРСКИЙ Я.К., АНДРЕЕВ А.Ю., ЯРОЦКАЯ И.В., МАРМАЛЮК А.А. Исследование полупроводникового дискового лазера с внутрирезонаторным удвоением частоты на основе гетероструктуры InGaAs/AlGaAs, выращенной методом MOCVD	162
БУТОРИНА А.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ГОРЕЛОВ А.А. Разработка электроабсорбционного модулятора на платформе InP	164
НАБИУЛЛИН И.С., КЛОЧКОВ А.Н., ВИНИЧЕНКО А.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С. Влияние режимов диффузии цинка из металлического слоя на токовые параметры электролюминесценции InGaAs/AlGaAs/GaAs-структур	166
Именной указатель авторов	168

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В КРЕМНИИ,
ЛЕГИРОВАННОМ СУРЬМОЙ

^{}С.Л. Прищепа^{1,2}, А.Л. Данилюк¹, А.Г. Трафименко¹*

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

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

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE HALL EFFECT
IN ANTIMONY-DOPED SILICON

^{}S.L. Prischepa^{1,2}, A.L. Danilyuk¹, A.G. Trafimenko¹*

¹Belarusian State University of Informatics and RadioElectronics
Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka street 6, e-mail: prischepa@bsuir.by

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

The Hall effect is investigated in Si doped with Sb with a concentration of 10^{18} cm^{-3} in the temperature range $2 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ in a magnetic field up to $H = 80 \text{ kOe}$. At $T > 100 \text{ K}$, the normal Hall effect is observed. At $28 \text{ K} < T < 90 \text{ K}$, it is modified. An activation mechanism with an energy of 1.7 meV is added to the band mechanism. In the region of $5 \text{ K} < T < 25 \text{ K}$, the Hall voltage is influenced by both band and activation mechanisms, as well as hopping conductivity. This causes the appearance of significant fluctuations in the dependence of the Hall voltage on the magnetic field $V_H(H)$. In this case, the linear dependence of $V_H(H)$ is still manifested on average. Below 5 K , the growth of $V_H(H)$ disappears on average. At $T = 2 \text{ K}$ and $10 \text{ kOe} < H < 50 \text{ kOe}$, the quantum Hall effect emerges, which vanishes at $H > 50 \text{ kOe}$, when the sign of the $V_H(H)$ changes.

Исследуется эффект Холла в кремнии, легированном сурьмой с концентрацией 10^{18} см^{-3} в области температур $T = 2 \div 300 \text{ К}$ в магнитном поле до $H = 80 \text{ кЭ}$. Установлено, что при $T > 100 \text{ К}$ наблюдается нормальный эффект Холла. При $28 \text{ К} < T < 90 \text{ К}$ он модифицируется. К зонному механизму добавляется активационный с энергией 1.7 мэВ . В области $5 \text{ К} < T < 25 \text{ К}$ на напряжение Холла оказывает влияние как зонный и активационной механизмы, так и прыжковая проводимость. Это обуславливает появление существенных колебаний зависимости напряжения Холла от магнитного поля $V_H(H)$. В этом случае еще проявляется в среднем линейная зависимость $V_H(H)$. Ниже 5 К рост $V_H(H)$ в среднем исчезает, т.е., по всей вероятности, зонный механизм перестает давать вклад. Напряже-

ние Холла $V_H(H)$ колеблется относительно нуля $V_H(H) = 0$, его величина определяется влиянием магнитного поля на прыжковый и простой активационный перенос электронов. Последний проявляется при $T < 4$ К [1]. При 3 К начинает проявляться квантовый эффект Холла (КЭХ), о чем говорит сублинейная зависимость $V_H(H)$ и признаки появления плато на ней. При $T = 2$ К появляется ярко выраженное плато на $V_H(H)$, что говорит о существенном проявлении КЭХ. Эта зависимость характеризуется также сменой знака напряжения Холла в области $H = 50 \div 60$ кЭ. Такой набор эффектов говорит о наличии, во-первых, электронной системы с нетривиальными свойствами, а во-вторых, о смене механизмов влияния магнитного поля на такую электронную систему. Как показано в наших работах [1, 2] электронная система в Si:Sb является неустойчивой и сильно коррелированной, характеризуется активационным переносом в области $2 \div 4$ К и прыжковым в области $5 \div 20$ К. Исследования КЭХ активно развиваются по нескольким направлениям, в том числе в 3D электронных системах [3, 4]. Для 3D материалов в магнитных полях энергия Ферми обычно пересекает одномерные полосы Ландау. Поэтому объемные состояния вносят вклад в некантованную холловскую проводимость. Формирование волн зарядовой плотности (ВЗП) [5] открывает запрещенную зону (энергетическую щель) в таких полосах Ландау в области энергии Ферми. Это делает материал похожим на стопку двумерных электронных слоев и ведет к квантованию удельного сопротивления Холла. Помимо механизма ВЗП, открытие щели может быть индуцировано другими корреляционными фазами в электронных системах, такими как волны спиновой плотности, кристалл Вигнера, или экситонный изолятор [3]. В нашем случае можно только утверждать, что электронная система является неустойчивой, а интерпретация механизма возникновения квантования сопротивления Холла требует дополнительного исследования. Смена знака эффекта Холла, которая происходит при $H = 50 \div 60$ кЭ, связана, по всей видимости, с воздействием квантующего магнитного поля на энергетический спектр электронной системы. По-видимому, КЭХ исчезает и возвращается квазинормальный эффект Холла, при котором наблюдается почти линейная зависимость $V_H(H)$. Механизм такого эффекта обусловлен переходом металл/диэлектрик, индуцируемый магнитным полем.

Литература

1. A.L. Danilyuk et al., Appl. Phys. Lett., **109**, 222104 (2016).
2. A.L. Danilyuk et al. J. Phys. Cond. Mat., **32**, 225702 (2020).
3. Shuai Li et al., npj Quantum Materials, **6**, 96 (2021).
4. F. Tang et al., Nature, **569**, 537 (2019).
5. F. Qin et al., Phys. Rev. Lett., **125**, 206601 (2020).

**СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 2DEG
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ AlGaIn/GaN, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ NH₃-MBE
НА САПФИРОВЫХ И КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ**

***^{*}Т.В.Малин¹, Д.С. Милахин^{1,2}, В.Г. Мансуров¹, В.И. Вдовин¹, А.С. Кожухов¹,
И.Д. Лошкарёв¹, И.А. Александров¹, Д.Ю. Протасов^{1,2}, К.С. Журавлёв¹***

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

²Новосибирский Государственный Технический Университет «НГТУ НЭТИ»,
г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, 630073, e-mail: nstu@nstu.ru

**ELECTROPHYSICAL PARAMETER COMPARISON OF 2DEG IN AlGaIn/GaN
HETEROSTRUCTURES GROWN BY THE NH₃-MBE TECHNIQUE ON SAPPHIRE
AND SILICON SUBSTRATES**

***^{*}T. Malin¹, D. Milakhin^{1,2}, V. Mansurov¹, V. Vdovin¹, A. Kozhukhov¹,
I. Loshkarev¹, I. Aleksandrov¹, D. Protasov^{1,2}, K. Zuravlev¹***

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Russia, Novosibirsk, 630090

²Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk, 630073

A comparative study of the structural properties of GaN layers and the electrophysical parameters of 2DEG in AlGaIn/GaN heterostructures grown by ammonia molecular beam epitaxy on sapphire and silicon substrates using identical buffer layer designs has been carried out. It is demonstrated that GaN layers grown under the same growth conditions have the similar surface morphology, regardless of the substrate material. It is shown that the dislocation density of compressed GaN layers grown on sapphire substrates up to 5 times lower than in crack-free and stretched GaN layers grown on silicon substrates. The measured values of electron mobility in heterostructures with 2DEG grown on sapphire substrates are higher by 30% than on silicon substrates ($\sim 1600 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ and $\sim 1200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$).

Проведено сравнение структурных свойств слоёв GaN и электрофизических параметров 2DEG в AlGaIn/GaN гетероструктурах выращенных методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках сапфира и кремния с использованием одинаковых конструкций буферного слоя. Продемонстрировано, что слои GaN выращенные в одинаковых ростовых условиях имеют одинаковую морфологию поверхности, в независимости от материала подложки. Показано, что плотность дислокаций сжатых слоёв GaN, выращенных на подложках сапфира в 5 раз меньше, чем в свободных от трещин и растянутых слоях GaN, выращенных на подложке кремния. Полученные значения подвижности электронов в

2DEG, в выращенных на сапфировых подложках гетероструктурах выше на 30% чем на кремниевых подложках ($\sim 1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $\sim 1200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$).

В данной работе проведено сравнение структурных свойств слоёв GaN и электрофизических параметров 2DEG в AlGaIn/GaN гетероструктурах выращенных методом NH_3 -MBE на подложках $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ и $\text{Si}(111)$ с использованием одинаковых конструкций буферного слоя и выращенных в одинаковых ростовых условиях. Морфология слоёв GaN контролировалось *ex situ* с помощью метода атомно-силовой микроскопии (см. рис. 1). Рост слоев GaN в данных ростовых условиях происходит согласно модели роста кристаллов Burton–Cabrera–Frank (BCF) [1]. Кристаллическое качество слоев GaN оценивалось методом дифракции рентгеновских лучей (ДРЛ). Плотности дислокаций рассчитывались по формуле для хаотически распределенных дислокаций [2].

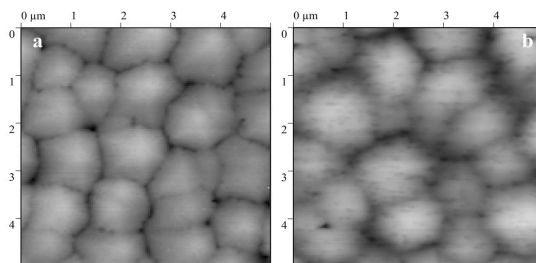


Рис. 1. AFM-изображения размером $5 \times 5 \text{ μm}^2$ ($Z_{\text{scale}} = 30 \text{ nm}$) морфологии поверхности слоёв GaN выращенных на подложках $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ (a) и $\text{Si}(111)$ (b)

В работе продемонстрировано, что используемый для подавления растрескивания слоёв GaN/Si(111), выращиваемых методом NH_3 -MBE, буфер с чередующимися слоями AlN и GaN позволяет получать свободные от трещин слои GaN/Si(111) толщиной более 1 мкм. Полученные значения подвижности электронов в 2DEG на сапфировой подложке ($\sim 1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) выше на 30% чем на кремниевой ($\sim 1200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) при концентрации двумерных электронов $1.0 \div 1.1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FWGW-2022-0005 «Гетероструктуры на основе материалов A_3B_5 для радиофотоники, СВЧ электроники и фотоэлектроники».

Литература

1. W.K. Burton et. al., *Philosoph. Trans. of the Royal Society A: Math., Phys. and Eng. Sci.*, **243**(866), 299–358 (1951) DOI:10.1098/rsta.1951.0006.
2. C.G. Dunn, E.F. Kogh, *Acta Metallurgica*, **5**(10), 548–554, (1957) DOI:10.1016/0001-6160(57)90122-0.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ DA-PHEMT

**Д.Ю. Протасов^{1,2}, А.К. Бакаров¹, К.С. Журавлев¹*

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;

HALL EFFECT IN THE HIGH ELECTRIC FIELDS FOR DA-PHEMT HETEROSTRUCTURES

D.Yu. Protasov^{1,2}, A.K. Bakarov¹, K.S. Zhuravlev¹

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

In heterostructure pHEMT with donor-acceptor doping (DA-pHEMT), the Hall effect was measured by the pulsed method at room temperature. The electric field strength increased up to 1.7 kV/cm. It is shown that, in this range of electric fields, there is no increase in the density of two-dimensional electric gas.

В последнее время для увеличения быстродействия транзисторов происходит стремительное уменьшение их размеров. Это приводит к тому, что даже при небольших приложенных напряжениях в транзисторе реализуется режим сильного электрического поля и происходит насыщение дрейфовой скорости электронов. Величина насыщенной скорости дрейфа $v_{нас}$ является важным параметром полупроводника, во многом определяющей свойства транзистора.

Обычно для экспериментального определения скорости дрейфа используется метод измерения проводимости полупроводника при приложении коротких субмикросекундных импульсов напряжения с большой амплитудой и с высокой скважностью для исключения разогрева образца. Использование данного метода измерения дрейфовой скорости предполагает, что концентрация носителей заряда в образце постоянна. Однако измерения эффекта Холла в сильных электрических полях показывают [1], что концентрация может увеличиваться на 20÷30% вследствие инжекции из контактов или ударной ионизации. Проводимость гетероструктуры возрастет при увеличении концентрации, что приведёт к ошибке при определении значения $v_{нас}$.

В данной работе методом импульсных холловских измерений была исследована гетероструктура pHEMT с донорно-акцепторным легированием (DA-pHEMT) [2]. Классические холловские мостики на исследуемой гетероструктуре были приготовлены методом фотолитографии. Омический контакт к образцу осуществлялся при помощи напыления слоев Ge/Au/Ni/Au с последующим вжиганием. Эффект Холла и проводимость структуры измерялась при приложении импульсов тока длительностью 800 нс с периодом повторения 5 мкс. Для измерения эффекта Холла использовался постоянный магнит с индукцией магнитного поля 0.2 Тл. Измерения проводились при комнатной температуре. Форма и амплитуда импульсов напряжения и тока контролировалась с помощью четырехканального цифрового осциллографа Tektronix TDS 3034 с шириной полосы 300 MHz.

Было установлено, что в исследованной гетероструктуре DA-pHEMT роста концентрации двумерного электронного газа не наблюдается вплоть до напряженности электрического поля 1.7 кВ/см.

Литература

1. W.-P. Hong et al., IEEE Trans. Electr. Dev., ED-34, 1491 (1987).
2. В.М. Лукашин и др., Письма в ЖТФ, **38**(17), с. 84-89 (2012).

**ЦИФРОВЫЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ БАРЬЕРЫ В ОБРАЩЕННЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ**

*С.А. Богданов¹, А.К. Бакаров², *К.С. Журавлёв², С.Н. Карпов¹, В.Г. Лапин¹,
В.М. Лукашин¹, *А.Б. Пащковский¹, Д.Н. Протасов, И.А. Рогачёв¹, Е.В. Терёшкин¹*

¹«Научно-производственное предприятие «ИСТОК» имени А.И. Шокина.

Россия, 141190, г. Фрязино, Московская область, ул. Вокзальная, д.2а,

e-mail: solidstate10@mail.ru

²Институт физики полупроводников им Академика А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск,

630090, пр-т Академика Лаврентьева 13, e-mail: kzhuravlev@mail.ru

**DIGITAL POTENTIAL BARRIERS IN INVERTED HETEROSTRUCTURES
WITH DONOR-ACCEPTOR DOPING**

*S.A. Bogdanov¹, A.K. Bakarov², *K.S. Zhuravlev², S.N. Karpov¹, V.G. Lapin¹,
V.M. Lukashin¹, *A.B. Pashkovskii¹, D.N. Protasov, I.A. Rogachov¹, E.V. Tereshkin¹*

¹Joint-stock company «Research & Production Corporation «ISTOK» named after A.I. Shokin

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

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

13, Lavrentiev avenue, Novosibirsk, Russia, 630090, e-mail: kzhuravlev@mail.ru

The first results of the study of inverted heterostructures with donor– acceptor doping and additional digital potential barriers based on AlAs are presented. It is shown that the introduction of digital barriers significantly by 30÷40% increases the electrons drift velocity overshoot when they enter the region of a strong field. The effect of hot upper-level electrons localization in superlattices at the edge of the quantum well, leading to an additional increase in the electron drift velocity, is found.

Известно, что крутизна полевого транзистора обратно пропорциональна расстоянию от затвора до канала, а рабочие частоты тем выше, чем выше средняя дрейфовая скорость электронов под затвором. В свою очередь, при субмикронной длине затвора средняя скорость электронов под затвором, определяется её всплеском при влёте в область сильного поля. В системах на основе GaAs и AlGaAs минимальное расстояние от затвора до канала реализуется в обращённых гетероструктурах, в том числе с дополнительными потенциальными барьерами на основе донорно-акцепторного легирования [1]. Величина всплеска дрейфовой скорости электронов при их влёте в область сильного поля в канале транзистора сильно зависит от степени локализации электронов в канале под затвором.

Дальнейшее увеличение высоты потенциальных барьеров в гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием требует увеличения поверхностной плотности доноров в n^+ -дельта слоях, что имеет опреде-

ленные технологические ограничения, а также приводит к увеличению рассеяния электронов в канале и снижает их подвижность. Однако, вместо однородных материалов как в спейсере между каналом и p^+ -дельта слоем, так и в нелегированном промежутке между дельта слоем и тонким p^+ слоем, можно использовать структуру, состоящую из набора чередующихся двух – трех монослоев широкозонного материала (AlAs) и трех – шести монослоев узкозонного материала (GaAs) – цифровых барьеров.

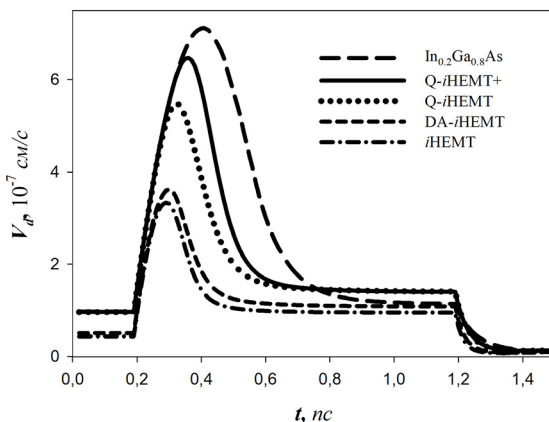


Рис.1 Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени. Электрическое поле при ($t=0\div0.2$ пс и $1.2\div1.5$ пс) $E=1$ кВ/см, при ($t=0.2\div1.2$) пс $E=20$ кВ/см, iHEMT – обращённая структура, DA-iHEMT – обращённая структура с донорно-акцепторным легированием, Q-iHEMT – обращённая структура с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами, Q-iHEMT+ – расчёт с учетом локализации состояний в сверхрешётке

Расчёты по модели [2] показали, что использование «цифровых» барьеров в гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием позволяет существенно (на 30÷40 %) увеличить дрейфовую скорость электронов. Помимо этого, в системе из чередующихся потенциальных барьеров типа сверхрешётки, появляются локализованные внутри нее состояния за пределами квантовой ямы канала. Это ведёт к дополнительному росту дрейфовой скорости электронов, и она приближается к теоретическому пределу для используемой модели – скорости электронов в чистом объёмном материале.

Литература

1. А.Б. Пашковский и др., Письма в ЖТФ, **43**(12), 42–51 (2017).
2. А.Б. Пашковский и др., Микроэлектроника, **49**(3), 210–225 (2020).

**О ПЛАЗМЕННЫХ РЕЗОНАНСАХ В ПРОВОДЯЩЕМ ДИСКЕ:
РОЛЬ ЭФФЕКТОВ ЗАПАЗДЫВАНИЯ**

****Д.А. Родионов^{1,2}, И.В. Загороднев¹***

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

²Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский переулок, д.9, e-mail: info@mipt.ru

**ABOUT PLASMON RESONANCES IN CONDUCTING DISK:
ROLE OF RETARDATION EFFECTS**

****D.A. Rodionov^{1,2}, I.V. Zagorodnev¹***

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

²Moscow Institute of Physics and Technology,
Russia, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, 9 Institutskiy per., e-mail: info@mipt.ru

The position and linewidth of plasma resonances in disks with two-dimensional electron gas are discussed taking into consideration the retardation effects. In presence of a metal electrode the width is an oscillation function of the distance between the electrode and the disk.

Недавно возник интерес к изучению плазменных колебаний в двумерных электронных системах в режиме, когда значимую роль играют эффекты электромагнитного запаздывания [1]. Фактически речь идет о структурах, характерные размеры которых больше или сравнимы с длиной волны возбуждающего излучения. Оказалось, что ширина плазменного резонанса в отличие от резонансной частоты не может быть описана феноменологическим квантованием волнового вектора в дисперсии плазменных колебаний в бесконечной системе, полученной, например, в работе [2]. Ключевой аспект в понимании такого расхождения – отсутствие радиационных потерь у плазмонов в бесконечной системе.

Благодаря круговой симметрии плазменные колебания можно описать двумя целыми числами: n_r – радиальное и l – орбитальное число. Они соответствуют количеству узлов плотности заряда по радиусу и полупериметру соответственно.

В ходе работы изучалось возбуждение плазменных колебаний в диске радиуса R с двумерным электронным газом с динамической проводимостью в модели Друде. Для описания системы удобно ввести безразмерные

величины: безразмерная частота $\tilde{\omega} = \frac{\omega R}{c}$, параметр запаздывания $\tilde{\Gamma} = \frac{2\pi n e^2 R}{m c^2}$ и столкновительный параметр $\tilde{\gamma} = \frac{R}{\tau c}$, где n , e , m – двумерные концентрация, заряд и эффективная масса носителей соответственно, а τ – время релаксации импульса носителей. Исследовались зависимости обезразмеренных положения и ширины осесимметричного ($l=0$, $n_r=1$) и фундаментального ($l=1$, $n_r=1$) плазменных резонансов, наблюдаемых в спектре поглощения электромагнитного излучения, от параметра запаздывания и столкновительного параметра.

Подробный анализ показал, что положение резонанса слабо зависит от столкновительного параметра [3]. Что касается ширины, то она не является просто суммой столкновительных и радиационных потерь, а содержит также «смешанный» вклад, за счет которого и происходит сужение линии резонанса, наблюдаемое в [1].

В данной работе также рассмотрено поведение плазменных резонансов при наличии бесконечной металлической пластины («затвора») на расстоянии d от диска. При сильном сближении диска и металла ($d \ll R$ и длины волны внешнего излучения) происходит подавление основного мультиполя за счёт взаимодействия с изображением, что приводит к уменьшению радиационных потерь и, следовательно, к уменьшению ширины линии плазменного резонанса. В случае когда расстояние превосходит длину волны, наблюдаются осцилляции в положении и ширине резонанса по параметру $\frac{\omega d}{c}$.

Работа выполнена в рамках РФФ 21-12-00287.

Литература

1. P.A. Gusikhin et al., Phys. Rev. Lett., **121**, 176804 (2018).
2. K.W. Chiu, J.J. Quinn, Phys. Rev. B, **9**, 4724 (1974).
3. I.V. Zagorodnev, D.A. Rodionov, A.A. Zabolotnykh, Phys. Rev. B, **103**, 195431 (2021).

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ

**А.Н. Клочков¹, *А. Ыскаков^{2,3,4}, А.Н. Виниченко¹, Д.А. Сафонов¹, М.В. Булавин²,
А.В. Галушко², И.С. Васильевский¹*

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

² Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6, e-mail: almas.9@mail.ru

³ Евразийский национальный университет им Л.Н. Гумилева
Казахстан, 010008, Алматы

⁴ Институт ядерной физики Республики Казахстан
Казахстан, 050032, Алматы, ул. Ибрагимова, 1

EFFECT OF NEUTRON IRRADIATION ON THE OPTICAL PROPERTIES OF DOPED QUANTUM WELLS

**A.N. Klochkov¹, *A. Yskakov^{2,3,4}, A.N. Vinichenko¹, D.A. Safonov¹, M.V. Bulavin²,
A.V. Galushko², I.S. Vasil'evskii¹*

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

² International Intergovernmental Organization Joint Institute for Nuclear Research
Russia, 141980, Moscow Region, Dubna, Joliot-Curie St, 6, e-mail: almas.9@mail.ru

³ L.N. Gumilyov Eurasian National University
Kazakhstan, 010008, Almaty

⁴ The Institute of Nuclear Physics
Kazakhstan, 050032, Almaty, Ibragimova street 1

The effect of neutron irradiation on the optical properties of doped heterostructures with a quantum well is experimentally studied by means of low-temperature photoluminescence spectroscopy. The properties of the AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs and InAlAs/InGaAs quantum wells are compared. The observed degradation effects after neutron irradiation on the shape of the photoluminescence spectra are revealed.

Легированные через спейсер квантовые ямы (КЯ) широко используются для создания быстродействующих транзисторов в СВЧ электронике. Для использования полупроводниковых приборов в условиях повышенного радиационного фона, например, в условиях открытого космоса, необходимо увеличивать их радиационную стойкость, поэтому исследования устойчивости гетероструктур к облучению нейтронами являются актуальными и востребованными.

Экспериментально исследовано воздействие нейтронного излучения на оптические и электронные свойства легированных гетероструктур с

треугольной КЯ AlGaAs/GaAs и прямоугольными КЯ AlGaAs/In_xGa_{1-x}As/GaAs ($x \approx 0.2$) и InAlAs/InGaAs. Легированные кремнием через спейсер слои GaAs расположены с одной, либо с двух сторон от КЯ. Измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ) гетероструктур проведены при температуре 77 К с помощью кремниевой CCD матрицы и спектрометра Naribo iHR-550. Концентрация и подвижность двумерного электронного газа при 77 К и 300 К исследованы путем измерения эффекта Холла и электросопротивления.

Гетероструктуры с КЯ были облучены нейтронами на экспериментальном канале №3 реактора ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна) с набором флюенсов – $2 \cdot 10^{14}$, $3.2 \cdot 10^{15}$ и $1.2 \cdot 10^{16}$ н/см². Соотношение флюенса тепловых $\Phi_{\text{тн}}$ и быстрых нейтронов $\Phi_{\text{бн}}$ составляло 0.25.

Основные эффекты влияния нейтронного излучения на гетероструктуры представляют собой радиационные дефекты при взаимодействии с быстрыми нейтронами, и трансмутационное легирование донорным оловом при захвате тепловых нейтронов ядрами индия. Интенсивность сигнала ФЛ монотонно снижается с увеличением дозы нейтронов. В спектрах ФЛ от КЯ InGaAs, после облучения нейтронами, снижается интенсивность коротковолнового плеча (область 910 нм на рис. 1) и появляется широкая диффузная люминесценция.

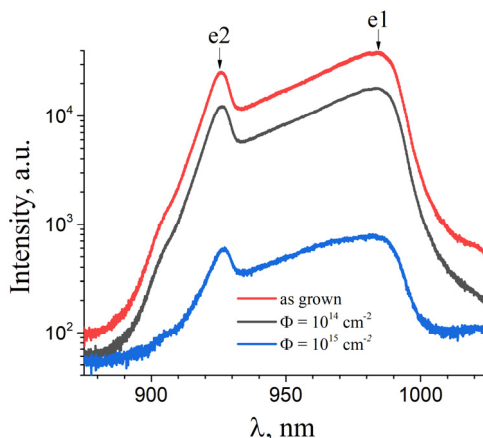


Рис. 1. Спектры ФЛ односторонне-легированной КЯ AlGaAs/In_xGa_{1-x}As/GaAs в зависимости от дозы нейтронного облучения

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЧ МИС
НА ОСНОВЕ GaAs**

****Д.М. Цунваза¹, И.С. Васильевский¹, А.А. Горелов¹, Р.В. Рыжук¹, Н.И. Каргин¹***

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: tsdamir321@gmail.com

**THE DESIGN OF PASSIVE ELEMENTS OF MIC BASED ON GaAs
IN MICROWAVE RANGE**

****D. Tsunvaza¹, I.S. Vasil'evskii¹, A.A. Gorelov¹, R.V. Ryzhuk¹, N.I. Kargin¹***

¹National Research Nuclear University «MEPhI»
Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: tsdamir321@gmail.com

The work is devoted to the design of scalable models of passive elements such as resistor, capacitor and inductor. The software AWR Design Environment of Cadence Design Systems is used for circuits simulation. Designed models show well compliance with measured data in frequency range 0.1÷50 GHz. Modelling errors are not above 15 per cent for all structures considered. Scalable models can be used in MEPhI elements library for the design of MIC in microwave frequency band.

Одним из ведущих трендов развития современной радиоэлектроники является увеличение полосы пропускания СВЧ приборов и устройств. Монолитные интегральные схемы (МИС) для реализации таких систем более предпочтительны, поскольку позволяют упростить процесс их создания, а также существенно снижают массогабаритные характеристики. Однако для СВЧ МИС требуется использование большого количества элементов, каждый из которых должен быть представлен адекватной моделью, позволяющей как можно точнее охарактеризовать его свойства. Поэтому целью данной работы является разработка масштабируемых моделей пассивных элементов: резистора, катушки индуктивности и конденсатора, с возможностью интеграции в САПР AWR Design Environment для создания СВЧ монолитных интегральных схем на основе GaAs технологий.

Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные образцы тонкоплёночного резистора (25х25), планарной катушки индуктивности (число витков N=5.5) и МДМ конденсаторов (15х15) и (40х60). Измерения S-параметров проводились на зондовой станции PM8, с использованием векторного анализатора цепей PNA-X и программного

обеспечения IVCAD в частотном диапазоне 0.1÷50 ГГц. На рис. 1 представлены S_{11} параметры пассивных компонентов. На основе полученных данных были составлены масштабируемые модели резистора, конденсатора и планарной катушки индуктивности (рис. 2).

В результате проведенного исследования было установлено, что погрешность моделирования не превышает 15% по сравнению с экспериментальными данными. Это позволяет использовать полученные модели в качестве библиотечных элементов при создании МИС СВЧ диапазона.

Работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030» с использованием оборудования центра коллективного пользования НИЯУ МИФИ «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников».

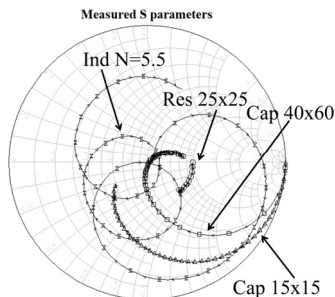


Рис. 1. Измеренные коэффициенты отражения от входа различных пассивных элементов: резистора (25x25), конденсаторов (40x60) и (15x15) и катушки индуктивности с числом витков $N=5.5$

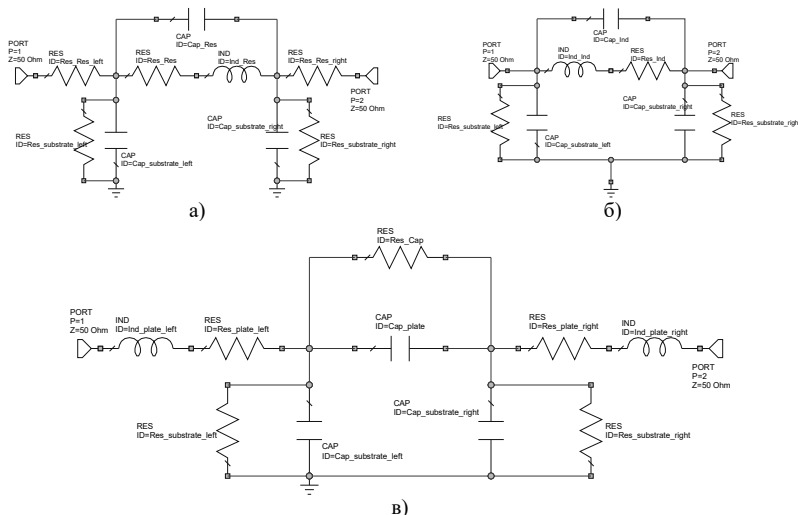


Рис. 2. Примеры реализации эквивалентных схем а) тонкоплёночного резистора; б) планарной катушки индуктивности; в) МДМ конденсатора

КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДИЗАЙН-ЦЕНТРА СВЧ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

**А.С. Сальников¹, И.М. Добуш¹, А.А. Калентьев¹, А.Е. Горайнов¹*

¹50ohm Lab, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: andrei.salnikov@main.tusur.ru

THE CONCEPT OF MICROWAVE MICROELECTRONICS DIGITAL DESIGN CENTER FOR WIRELESS COMMUNICATION

**A.S. Salnikov¹, I.M. Dobush¹, A.A. Kalentyev¹, A.E. Goryainov¹*

¹50ohm Lab, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Russia, 634050 Tomsk, Lenina Avenue 40, e-mail: andrei.salnikov@main.tusur.ru

The continuous growing of civil wireless communication market results in high demand for microwave monolithic integrated circuit. Both process technology and design approaches should evolve to satisfy the tighten requirements. We suggest a concept of digital design center which means a high automation of circuit design and element modeling flows. During the conference talk some methods for microwave circuit synthesis will be considered. The measurement results of the synthesized circuit will be presented. Also, the PDK development will be described. The suggested approach allows using PDK model during the synthesis.

Интенсивное развитие гражданских рынков беспилотных автомобилей, интернета вещей и беспроводных систем связи нового поколения привело к лавинообразному возрастанию спроса на приемо-передающие модули СВЧ-диапазона на основе полупроводниковых технологий, поскольку они обеспечивают минимальные размеры и энергопотребление. Число подключенных к сети мобильных телефонов составило 8.3 миллиарда, а устройств интернета вещей – 11.3 миллиарда. Трафик мобильного интернета за последние пять лет вырос в 10 раз и в 2021 году достиг 65 экзабайт в месяц. Таким образом, спрос на полупроводниковые устройства для передачи данных растет, а требования по характеристикам все время ужесточаются. Под влиянием экономических причин постоянно совершенствуются технологические процессы изготовления устройств. Однако решений в области технологии изготовления недостаточно — процессы проектирования микроэлектронных устройств также должны развиваться, чтобы в сжатые сроки разрабатывать новую продукцию, удовлетворяющую требованиям рынка.

Проектирование микроэлектронных устройств выполняется в дизайн-центрах. Под дизайн-центром понимают отдельную организацию или

структурное подразделение, решающее задачу создания новой электронной продукции и доведения ее до серийного производства. Чтобы выдерживать современный уровень конкуренции, дизайн-центр должен использовать все возможности для повышения эффективности. Процесс разработки СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) сопряжен с высокой стоимостью и трудоемкостью. Процесс поиска схемного решения можно отнести к области инженерного творчества, при этом, несмотря на сложность задач, решать их приходится в кратчайшие сроки. Дополнительно все сдерживается острым дефицитом квалифицированных проектировщиков.

Ответом на вызовы, стоящие перед разработчиками СВЧ МИС, является радикальное повышение производительности труда. Решение задачи состоит в автоматизации процесса проектирования. Схемы СВЧ-диапазона в данный момент автоматизированы менее всего, имеются единичные работы в этом направлении. Тем не менее такие схемы являются основой для работы микроэлектронных приемо-передающих модулей. На автоматизацию разработки СВЧ МИС и направлена представляемая работа. Дизайн центр с высокой степенью автоматизации мы будем называть цифровым.

Первая составляющая автоматизации – это синтез СВЧ МИС. Синтез подразумевает получение схемы или топологии устройства в автоматическом режиме. Для синтеза относительно простых схем, например, фильтров, существуют детерминированные алгоритмы. Для более сложных схем в настоящее время все шире привлекаются методы искусственного интеллекта. Например, многокритериальные эволюционные алгоритмы позволяют решить задачу оптимизации фильтра низких частот, проводя поиск по 160 структурным параметрам и 4 основным характеристикам одновременно [1]. Этот же метод применим для миниатюризации СВЧ-структур [2, 3]. В работе [4] показано многокритериальное проектирование СВЧ генератора, которое позволяет менее чем за 2 минуты получить рабочее решение. В работе [5] генетические алгоритмы применены для синтеза преобразователя энергии СВЧ-излучения в постоянный ток для систем беспроводной передачи энергии. В работе [6] описывается эволюционный алгоритм, использующий суррогатные модели, позволяющий провести глобальный поиск решения задачи проектирования СВЧ-фильтров на основе линий передач. Для синтеза усилителей мощности также используются методы глубокого обучения [7]. В работе [8] предложен метод синтеза согласующих цепей на основе трансформатора, в котором нейронная сеть глубокого обучения используется для расчета элек-

трических и геометрических параметров. В статье [9] описывается, как эволюционные вычисления позволяют решить задачу размещения большого количества чипов, входящих в состав антенных фазированных решеток.

Вторая составляющая – автоматизированная разработка библиотек базовых элементов, англ. Process Design Kit (PDK). Обычно задача разработки PDK решается фабрикой-изготовителей СВЧ МИС, причем каждым производителем самостоятельно. Если необходимо за небольшое время разработать большое число PDK, например, при форсированном развитии радиоэлектронной отрасли в стране, целесообразно пойти по пути разделения труда. Перенеся задачу разработки PDK в цифровой дизайн-центр, можно повысить эффективность труда за счет автоматизации процесса, а также избежать дублирования навыков, методик и инструментов разработки PDK, развиваемых на каждом предприятии независимо. При разработке PDK необходимо обработать большой массив результатов измерений для каждого элементов МИС, собрать статистику, построить его модель. После этого необходимо разработать исходный код автоматизированных топологических ячеек (PCell), структуры PDK, инструментов DRC и LVS, а также тщательно протестировать результат. Автоматизация позволяет ускорить это процесс. В пресс-релизе Cadence отмечается, что автоматизация позволила сократить вдвое расходы и время выпуска PDK [10]. Однако публикаций по системной и полной автоматизации разработки PDK довольно мало. В статье [11] описана разработка PDK для органической электроники и отмечается, что каждый шаг был автоматизирован. Также встречаются работы по разработке инструментов для редактирования исходного кода элементов библиотеки [12] и автоматизированного тестирования PDK [13, 14].

В настоящий момент в лаборатории 50ohm Lab ТУСУР разработаны автоматизированные методики:

- обработки результатов измерений (выбор среднего прибора, сглаживание измерений, деэмбеддинг);
- построения моделей пассивных элементов СВЧ МИС (резистор, МДМ-конденсатор, планарная катушка индуктивности);
- построения моделей линейных GaAs pHEMT транзисторов в усилительном и ключевом режиме;
- построения моделей нелинейных GaAs pHEMT транзисторов;
- сопряжения коммерческих библиотек элементов сторонних САПР и программ синтеза;

- синтеза архитектуры радиосистемы и поставки требований к функциональным блокам;
- синтеза усилителя с распределенным усилением;
- синтеза ступенчатого аттенюатора;
- синтеза ступенчатого фазовращателя;
- синтеза цифрового последовательно-параллельного драйвера управления.

Часть методик реализованы в интеллектуальной САПР Смекалец [15]. В докладе на конференции будут представлены разработанные модули и СВЧ-устройства, синтезированные с помощью предложенных методик. Тестовые образцы устройств были изготовлены и измерены. Также в докладе будет затронут вопрос проектирования библиотек базовых элементов (PDK) для отечественной технологии изготовления СВЧ МИС и использования их в процессе синтеза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10036).

Литература

1. D. Ding et al., Int. Conf. Microw. Millim. Wave Technol. ICMMT 2019 – Proc., 1–3 (2019).
2. S. Koziel and A. Bekasiewicz, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., **64**, 2454 (2016).
3. S. Koziel et al., IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., 1–3 (2015).
4. L.C. Brito and P.H.P. de Carvalho, SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. – IMOC, 135–139 (2003).
5. T. Akada and K. Fujimori, 50th Eur. Microw. Conf., 61–64 (2021).
6. B. Liu et al., IEEE Trans. Microw. Theory Tech., **65**, 1976 (2017).
7. L. Kouhalvandi et al., IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., 233–236 (2021).
8. S. Er et al., IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., 66–69 (2021).
9. N. Anselmi et al., IEEE Trans. Antennas Propag., **66**, 6906 (2018).
10. Cadence Design Systems, Spansion and Cadence, 2 (2012).
11. A. Arnal et al., IEEE 8th Electron. Syst. Technol. Conf., 1–5 (2020).
12. A. Datsuk et al., IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng., 2067–2071 (2021).
13. R.E.N. Congfei et al. (2014).
14. Y. Li et al., IEEE 11th Int. Conf. Solid-State Integr. Circuit Technol., 1–4 (2012).
15. А.А. Калентьев и др., Электроника НТБ **3**, (2022).

ВЖИГАНИЕ ПЛАТИНЫ В ТЕХНОЛОГИИ ЗАТВОРОВ GaAs pHEMT ТРАНЗИСТОРОВ

Ю.Ю. Смирнов¹, М.В. Дразуть^{1,2}

¹АО «ОКБ-Планета», Россия, 173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а,
e-mail: smirnovyy@okbplaneta.ru

²Новгородский Государственный Университет имени Ярослава Мудрого,
173003, г. В. Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 44

BURIED PLATINUM GATE IN GAAS PHEMT TECHNOLOGY

U.U. Smirnov¹, M.V. Dragut^{1,2}

¹JSC “OKB-Planeta”, Russia, 173000, V. Novgorod, Bolshaya Moskovskaya, 13a,
e-mail: smirnovyy@okbplaneta.ru

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
173003, V. Novgorod, Bol'shaya St. Peterburgskaya, 44

GaAs pHEMTs were fabricated by depositing Pt-based multilayer metallization and then applying a post-annealing process. The performances of the fabricated 0.25-um-gate pHEMTs before and after the post-annealing were characterized. After annealing, the extrinsic transconductance was increased from 400 to 600 mS/mm. The unity current gain cutoff frequency (fT) was reached 70 GHz.

При большой внутренней крутизне, на значение внешней крутизны сильное влияние оказывает паразитное сопротивление истока GaAs pHEMT транзистора. Нормально-закрытые транзисторы, при прочих равных, имеют большую внутреннюю крутизну, в то же время паразитное сопротивление, локализованное в канавке транзистора из-за большей глубины травления, у них так же выше чем у нормально открытых транзисторов. Одним из способов уменьшения паразитного сопротивления является вжигание металла затвора, который, реагируя с полупроводником, образует металлическую фазу, тем самым приближая барьер Шоттки к каналу транзистора, без необходимости травления глубокой канавки.

Нормально-закрытые транзисторы формировались на GaAs pHEMT MBE структурах. Для получения омических контактов использовался сплав золото-германий. Изоляции структур проводилась ионной имплантацией бора. Электронно-лучевая литография применялась для получения маски канавки и затвора. Методом электронно-лучевого напыления формировалась металлизация затвора, Pt(10 нм)/Ti/Pt/Au/Ti. После удаления резиста, пластина пассивировалась низкотемпературной (T=250 °C) плёнкой SiO₂.

Вжигание проводилось в вакууме, с использованием для нагрева гетерозипитаксиальной структуры галогеновой лампы, расположенной с обратной стороны пластины, при температурах в диапазоне от 250 до 300 °C и длительности каждого отжига 1÷3 минуты. Время отжига считалось от момента регистрации требуемой температуры термопарой. По прошествии требуемого времени, галогеновые лампы отключались, и пластина начинала остывать. Измерения параметров (ВАХ, передаточная характеристика, крутизна от напряжения затвора, ток утечки затвора) проводились на одних и тех же транзисторах с помощью измерительного комплекса В1500, кроме того, после отжига, из высокочастотных измерений S-параметров, определялась граничная частота транзисторов. На рисунке 1 показаны полученные результаты, граничная частота составила (68÷72) ГГц. Видно, что по прошествии времени при определенной температуре, сильных изменений в параметрах транзисторов не наблюдается, что говорит о завершении реакции между слоями гетероструктуры и платиной.

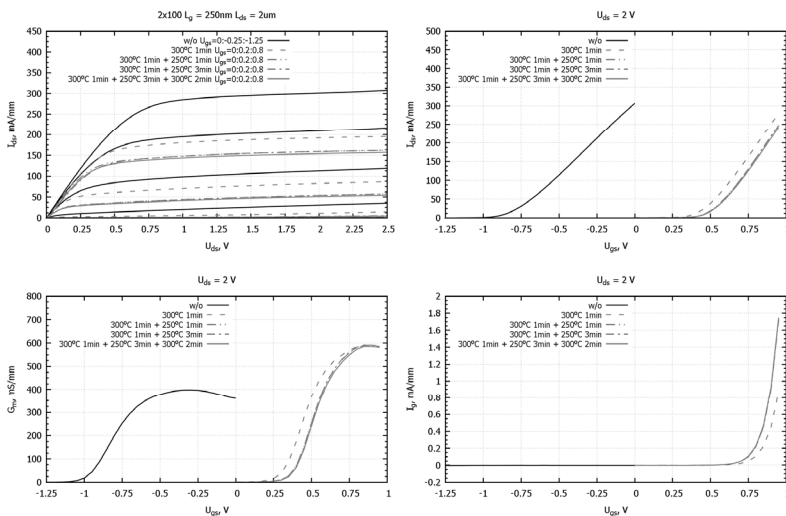


Рис. 1. Изменение параметров транзисторов во время вжигания

Таким образом, показано влияние процесса вжигания слоя платины в систему гетерозипитаксиальных слоёв на комплекс параметров рНЕМТ транзистора, что позволяет использовать этот процесс в их технологии для улучшения статических и СВЧ характеристик.

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ 3D МДП КОНДЕНСАТОРОВ

**П.С. Васильев¹, М.В. Дразуть^{1,2}, В.А. Лукин¹*

¹АО «ОКБ-Планета», Россия, 173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а,
e-mail: vasilevps@okbplaneta.ru

²Новгородский Государственный Университет имени Ярослава Мудрого,
173003, г. В. Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 44

DEVELOPMENT OF SILICON ICP ETCHING PROCESS IN 3D MIS CAPACITOR TECHNOLOGY

**P.S. Vasilev¹, M.V. Dragut^{1,2}, V.A. Lukin¹*

¹JSC "OKB-Planeta", Russia, 173000, V. Novgorod, Bolshaya Moskovskaya, 13a,
e-mail: vasilevps@okbplaneta.ru

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 173003, V. Novgorod,
Bol'shaya St. Peterburgskaya, 44

The aim of this work was development of the process for plasma chemical etching of silicon to produce 3D capacitors. Etching was performed in SF₆ - Ar plasma with passivation by oxygen, as well as using Bosch-process with passivation by CHF₃. A comparison of the results of measuring the average etching rate of silicon and its dependence on the hole diameter was presented.

Одной из важнейших задач, постоянно стоящих перед специалистами, занимающимися разработкой и производством микро- и нанoeлектронной компонентной базы, является дальнейшее повышение удельной ёмкости интегральных конденсаторов. Существуют различные конструктивные и технологические методы её решения, заключающиеся в: применении диэлектрических плёнок с повышенным значением относительной диэлектрической проницаемости (Ta₂O₅, HfO₂ и др.), созданием двухслойных конденсаторов (integrated stacked capacitors), комбинации этих способов и т.д. Среди применяемых методов, отдельно нужно выделить способ повышения эффективной площади интегрального конденсатора при помощи методов микропрофилирования, позволяющих создавать структуры с развитой поверхностью, благодаря чему удаётся увеличить удельную ёмкость более чем в 10 раз, по сравнению с плоским конденсатором [1]. Создаваемые таким способом 3D конденсаторы (trench capacitors) находят широкое применение, как в качестве интегральных элементов быстродействующих схем, так и в качестве дискретных компонентов (развязывающих конденсаторов) широко применяемых при сборке СВЧ устройств. Настоящая публикация посвящена описанию научно-практической работы по разработке технологии создания СВЧ 3D МДП конденсаторов при

помощи методов сухого микропрофилирования высоколегированных кремниевых пластин.

Процесс ПХТ кремния для 3D конденсаторов должен обеспечивать: высокую анизотропию, что необходимо для формирования структур с высоким аспектным соотношением при размере окон в маскирующем слое не более 10 мкм и высокую чистоту (морфологию) боковых стенок и дна микроструктур. Только выполнение этих условий позволит существенно увеличить удельную ёмкость МДП структуры и не приведёт к недопустимому уменьшению электрической прочности системы диэлектрических плёнок, разделяющих обкладки 3D конденсатора.

Для исследования процесса ПХТ был разработан специальный тестовый ФШ, позволяющий формировать в маскирующем слое окна различного размера (от 2 до 100 мкм) и конфигурации. В качестве маски использовалась плёнка $\text{SiO}_{2(\text{терм.})}$, толщиной 0.8 мкм, а также её комбинации с различными типами фоторезистов. Микропрофилирование производилось на установке SI-500, было произведено исследование двух технологий травления. В первом случае, для обеспечения максимальной чистоты, была использована смесь газов SF_6 и Ar (в ряде процессов с добавкой O_2). Вторая технология была отработана на основе Bosch-процесса. В качестве

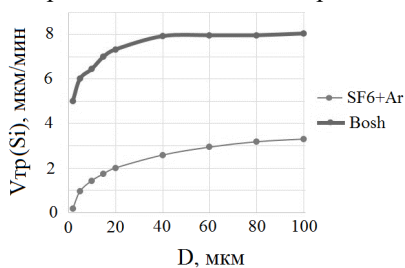


Рис. 1. Зависимость средней скорости травления кремния от диаметра окна в плёнке SiO_2

пассивирующего поверхность газа был использован CHF_3 , травление кремния производилось так же в смеси SF_6 и Ar. В ходе исследования полученных микроструктур были определены основные параметры процесса микропрофилирования: селективность, коэффициент анизотропии, средняя скорость, показатели шероховатости дна, а также закономерности их изменения в зависимости от технологиче-

ских режимов, и что очень важно в технологии 3D конденсаторов, от размеров окон маскирующего слоя. В качестве примера, на рисунке 1 приведена полученная зависимость средней скорости травления кремния при оптимальных технологических режимах от размера окон в маскирующем слое.

Литература

1. Г.В. Баранов, А.В. Волосов, Наноиндустрия, 13, S4(99) (2020).

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ ТИПА QFN ДЛЯ СВЧ МИС

**А.К. Оказов¹, М.В. Драгут^{1,2}*

¹АО «ОКБ-Планета» Россия, 173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а,
е-mail: okazovak@okbplaneta.ru, dragutmv@okbplaneta.ru.

²Новгородский Государственный Университет имени Ярослава Мудрого,
173003, г. В. Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 44

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF QFN-TYPE CERAMIC PACKAGES FOR MICROWAVE MIC

**A.K. Okazov¹, M.V. Dragut^{1,2}*

¹JSC "OKB-Planeta", Russia, 173000, V. Novgorod, Bolshaya Moskovskaya, 13a,
е-mail: okazovak@okbplaneta.ru, dragutmv@okbplaneta.ru.

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 173003, V. Novgorod,
Bol'shaya St. Peterburgskaya, 44

The paper presents manufacturing technology of QFN-type packages by ceramic materials for MIC: Al_2O_3 or AlN. Manufactured QFN-type packages was analyzed, what shown it can be used on frequencies up to 9 GHz.

Корпусирование кристаллов СВЧ компонентов (монолитных схем (МИС), транзисторов и т.д.) в подавляющем большинстве случаев приводит к ухудшению их параметров: уменьшению рабочей полосы частот, снижению коэффициента усиления, повышению коэффициента шума и т.д. Это обстоятельство связано с наличием у корпуса потерь, реактивностей, которые комплексно ухудшают СВЧ характеристики элементов. Это обстоятельство обуславливает то, что СВЧ-корпуса имеют особую конструкцию [1]. Между тем, в настоящее время объективно наблюдается дефицит качественных отечественных и недорогих доступных импортных корпусов, которые можно было бы успешно применять для сборки кристаллов СВЧ МИС самого широкого функционального назначения. Предлагаемая работа посвящена разработке универсальной технологии изготовления линейки керамических корпусов типа QFN (Quad Flat Non-Leads), оптимизированных для применения в диапазоне СВЧ.

Технология производства корпусов типа QFN основывается на базовой технологии изготовления керамических плат СВЧ ГИС разработанной в АО «ОКБ-Планета». Она включает в себя процессы изготовления многослойных систем металлизации с низким уровнем потерь как на лицевой, так и на обратной сторонах подложки, технологию формирования низко-

омных, вакуум плотных переходных металлизированных отверстий, лазерные методы обработки керамических материалов [2].

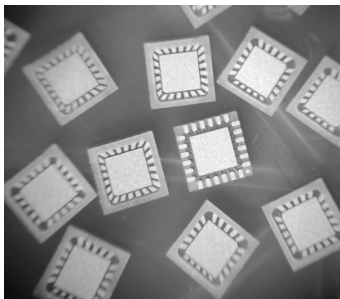


Рис. 1. Изготовленные корпуса типа QFN

Были разработаны и изготовлены опытные образцы корпусов на керамике на основе Al_2O_3 (поликор) и AlN , толщиной 0.25 мм с различным количеством полосковых сигнальных выводов (20 и 24 шт.) и габаритными размерами (4x4x1) мм, рис. 1.

Для исследования частотных свойств изготовленных корпусов была разработана специальная тестовая плата, позволяющая произвести прямое измерение величины потерь, уровня согласования с СВЧ-трактом и развязки корпуса. Результаты измерения (рис. 2) показывают, что полученные образцы корпусов могут успешно применяться на СВЧ вплоть до X-диапазона.

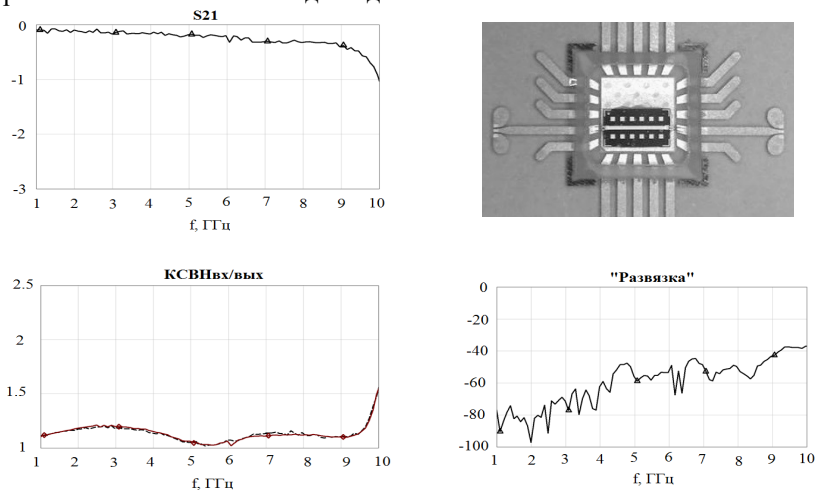


Рис. 2. Результаты измерения СВЧ параметров изготовленных корпусов типа QFN

Литература

1. М.В. Драгутъ и др., Материалы XXI координационного научно-технического семинара по СВЧ технике – Нижний Новгород, 79-81 (2021).
2. М.В. Драгутъ и др., Международный форум «Микроэлектроника-2018» М.: Техносфера, 374-378 (2018).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР AlGaN/AlN/GaN, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ АЗОТА

**Д.Г. Федоров¹, Г.М. Боченко^{1,2}, А.В. Желаннов¹, Б.И. Селезнев²*

¹АО «ОКБ-Планета». ул. Большая Московская, 13А, 173004, Великий Новгород,
е-mail: FedorovDG@okbplaneta.ru

²Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
Россия, 173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41

CHARACTERISTICS OF HETEROEPITAXIAL STRUCTURES AlGAN/AlN/GAN IMPLANTED WITH NITROGEN IONS

**D.G. Fedorov¹, G.M. Bochenkov^{1,2}, A.V. Zhelannov¹, B.I. Seleznev²*

¹SC OKB-Planeta, Russia, 173004, Veliky Novgorod, ul. Bolshaya Moskovskaya, 13A,

²Yaroslav the Wise Novgorod State University,
Russia 173003 Veliky Novgorod, ul. Bolshaya St. Petersburg, 41

The technological cycle of the formation of device-to-device insulation on an AlGaN/AlN/GaN heteroepitaxial structure grown on a silicon substrate using ion implantation technology is considered. Measurements of the resistance of the interdevice insulation formed by the ion implantation method were carried out. The dependence of the interdevice insulation resistance on the dose of the introduced nitrogen impurity is obtained.

Гетероэпитаксиальные структуры AlGaN/AlN/GaN являются перспективным материалом для изготовления микроприборов нового поколения, которые способны работать в экстремальных условиях [1]. Одним из этапов формирования приборов на гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN является создание межприборной изоляции.

В настоящей работе было рассмотрено использование имплантации ионами азота N⁺ для операции формирования межприборной изоляции, являющейся одной из операций в технологическом маршруте изготовления микроприборов на гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN. Для оценки удельного поверхностного сопротивления были сформированы тестовые структуры с омическими контактами, разделенными полупроводником с известными размерами (рис.1).

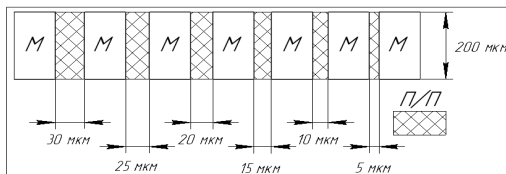


Рис.1. Схематическое изображение тестовых структур

Для выбора режимов ионной имплантации при формировании меж-приборной изоляции было проведено несколько процессов легирования с различными дозами (табл. 1) и энергией внедряемых ионов $E = 125$ кэВ, величина которой определялась исходя из результатов моделирования процесса ионной имплантации в программе TRIM.

После ионной имплантации были проведены замеры сопротивления тестовых структур. Методом длинной линии был проведен расчет удельного поверхностного сопротивления R_s (Ом/Г) (табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерений удельного поверхностного сопротивления после ионной имплантации

D, см ⁻²	$R_{уд}$, Ом/Г	D, см ⁻²	$R_{уд}$, Ом/Г
$6.25 \cdot 10^{11}$	$3.55 \cdot 10^3$	$3.75 \cdot 10^{12}$	$6.81 \cdot 10^{10}$
$1.25 \cdot 10^{12}$	$2.60 \cdot 10^4$	$4.37 \cdot 10^{12}$	$7.56 \cdot 10^{10}$
$1.87 \cdot 10^{12}$	$3.47 \cdot 10^6$	$6.25 \cdot 10^{12}$	$7.47 \cdot 10^{10}$
$2.5 \cdot 10^{12}$	$5.66 \cdot 10^8$	$3.13 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{11}$
$3.13 \cdot 10^{12}$	$3.20 \cdot 10^{10}$	$6.25 \cdot 10^{13}$	$7.27 \cdot 10^{10}$

На рис. 2 представлен график зависимости удельного поверхностного сопротивления от дозы имплантируемой примеси N^+ в AlGaIn/AlN/GaN. Из данного графика видно, что удельное поверхностное сопротивление увеличивается с ростом дозы имплантации и максимальное значение R_s составило $1 \cdot 10^{11}$ Ом/Г при дозе имплантации $3.13 \cdot 10^{13}$ см⁻². Увеличение дозы выше $3.13 \cdot 10^{13}$ см⁻² не приводит к изменению R_s .

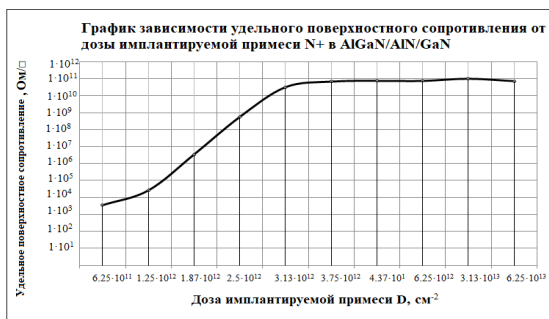


Рис. 2. График зависимости удельного поверхностного сопротивления от дозы имплантируемой примеси N^+ в GaN

Литература

1. H. Chiu, C. Chen, H. Kao, Microelectronics Reliability, **53**, 1897–1900 (2013).

**ТЕХНОЛОГИЯ И ПАРАМЕТРЫ ИНТЕГРАЛЬНОГО pHEMT ТРАНЗИСТОРА
НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAs X И Ku ДИАПАЗОНОВ**

****М.В. Драгуты,¹ Б.И. Селезнев,² Д.М. Мишарин¹***

¹АО «ОКБ-Планета»

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

e-mail: dragutmv@okbplaneta.ru

²Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,

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

**TECHNOLOGY AND PARAMETERS OF AN INTEGRAL pHEMT TRANSISTOR BASED
ON GaAs X AND Ku BAND HETEROSTRUCTURES**

****M.V. Dragut¹, B.I. Seleznev,² M.D. Misharin¹***

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

e-mail: dragutmv@okbplaneta.ru

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,

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

The technological cycle of manufacturing an active element of a pHEMT transistor with a- gate length other 0.25 μm as part of a microwave monolithic integrated circuit based on gallium arsenide is considered. The requirements for the level of the main parameters of the integrated pHEMT transistor have been developed. As the initial heterostructure, we chose a pHEMT structure with two-sided filling of the channel with electrons – a DpHEMT structure, which provides low noise figure and a high level of specific output microwave power. The developed transistors for microwave MMIC low-noise amplifiers and Ku-band power amplifiers satisfy the required level of the main parameters of the integral pHEMT gallium arsenide transistor.

Наиболее сложными изделиями полупроводниковой СВЧ микроэлектроники являются монолитные интегральные схемы (МИС), выполняющие различные функции обработки электрических сигналов. В настоящее время большое внимание уделяется полному освоению X- и Ku- частотных диапазонов ((8÷18) ГГц), как в гражданских, так и в специальных системах [1]. Структура СВЧ МИС включает в себя: 1 – pHEMT транзистор с субмикронным Т-образным затвором (в данном случае длина затвора $L_g = 0.25$ мкм); 2 – резистор на основе тонкой плёнки резистивного сплава; 3 – тонкоплёночный полупроводниковый резистор; 4 – интегральную линию передачи; 5 – МДМ-конденсатор; 6 – интегральный элемент заземления (металлизированные отверстия).

Проведен анализ технологических особенностей изготовления активного элемента – рНЕМТ транзистора с длиной затвора 0.25 мкм в составе СВЧ монолитной интегральной схемы на арсениде галлия. Основная область применения этой технологии, при проектировании различных типов усилителей, это МИС с рабочими частотами до Ку-диапазона (18 ГГц). Сформулированы требования к уровню основных параметров интегрального рНЕМТ транзистора. Предложена структура интегрального рНЕМТ транзистора, обеспечивающая получение необходимого набора параметров. В качестве исходной гетероструктуры выбрана рНЕМТ структура с двухсторонним наполнением канала электронами – ДрНЕМТ структура, обеспечивающая низкие значения коэффициента шума и высокий уровень удельной выходной СВЧ мощности. Особенностью формирования металлизации Т-образного затвора в настоящей работе является нанесение на слой Au тонкого слоя Ti толщиной (4÷5) нм с целью улучшения адгезии, наносимой в дальнейшем пассивирующей пленки SiO₂. Проведен анализ конструкций подзатворных канавок СВЧ рНЕМТ транзисторов. Методами ИК Фурье спектроскопии исследована структура низкотемпературных плёнок SiO₂, полученных химическим осаждением из газовой фазы. В спектрах ИК-пропускания пленок SiO₂ наблюдается полоса пропускания в области 883 см⁻¹, обусловленная дефицитом по кислороду (Si₂O₃). Для устранения дефицита по кислороду использовался фотонный отжиг. Омические контакты на пластине создавались при помощи «взрывной» литографии после процесса вакуумного напыления необходимой системы металлов: AuGe/Mo/Au/Mo. Данная система металлизации, включающая Mo, в отличие от систем на основе Ni, обладает рядом преимуществ.

Разработанные транзисторы для СВЧ МИС маломощных усилителей и усилителей мощности Ку-диапазона удовлетворяют требуемому уровню основных параметров интегрального рНЕМТ транзистора на арсениде галлия. Измеренные значения коэффициента шума и усиления по мощности на частоте 12 ГГц составили: Кш мин ≤ 0.6 дБ, К_{ур} опт ≥ 12.5 дБ (U_{си}=2 В, I_{си}=15 мА).

Литература

1. Л.И. Бабак и др., Электрон. техн., Сер. 3 Микроэлектрон., 4 (160), 4 (2015).

СЕЛЕКТИВНОЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ В ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ GaN/AlGaN ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НОРМАЛЬНО-ЗАКРЫТОГО ТРАНЗИСТОРА

****В.А. Гребенников^{1,2}, А.В. Желаннов¹, Б.И. Селезнев²***

¹АО «ОКБ-Планета».

Россия, 173000, Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13А,
+7(963)3318219, email: vasiligreb@mail.ru

²Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого.
Россия, 173000, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41

SELECTIVE PLASMA-CHEMICAL ETCHING IN AN INDUCTIVELY COUPLED PLASMA OF A GaN/AlGaN HETEROEPITAXIAL STRUCTURE DURING THE FORMATION OF A NORMALLY-OFF TRANSISTOR

****V.A. Grebennikov^{1,2}, A.V. Zhelannov¹, B.I. Seleznev²***

¹SC OKB-Planeta

Russia, 173000, Velikiy Novgorod, ul. Bolshaya Moskovskaya, 13A,
+7(952)4889548, email: vasiligreb@mail.ru

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

The technology of selective plasma-chemical etching in an inductively coupled plasma of a p-GaN layer of an AlGaN/AlN/GaN heteroepitaxial structure on Si is considered. The influence of various parameters on the process of plasma-chemical etching has been studied, and the optimal mode has been found. The dependences of the etch depth on the etch time were obtained, and the selectivity of p-GaN to AlGaN was determined.

Гетероструктуры GaN и его твердых растворов обладают набором физических свойств, которые обеспечивают электронным приборам на их основе оптические, мощностные и частотные характеристики, позволяющие применять эти приборы в разных областях микроэлектроники. Сам же GaN является перспективным материалом для следующего поколения мощной и высокочастотной электроники.

Классические GaN/AlGaN-транзисторы – это нормально-открытые приборы, работающие в режиме обеднения. Однако, для более широкого применения в монолитных схемах и силовых приборах необходимо реализовать так называемый *E*-режим работы, или нормально-закрытое состояние транзисторов, когда ток течет при нулевом смещении на затворе. Возможность реализации *E*-режима открывает широкие перспективы для проектирования цифровых схем и устройств силовой электроники [1].

Для получения нормально-закрытых транзисторов было предложено несколько подходов, однако наиболее перспективным подходом является использование р-GaN области на гетероструктуре AlGaN/GaN под затвором. Наличие слоя р-GaN приводит к истощению канала ДЭГ даже при отсутствии внешнего смещения ($V_G = 0$).

Для формирования омических контактов в процессе изготовления транзистора, необходимо селективно удалить верхний слой р-GaN толщиной 70 нм при этом оставив слой AlGaN без существенных повреждений. Чистый BCl_3 малоэффективен при травлении GaN, смешивание BCl_3 с SF_6 увеличивает количество радикалов хлора, что повышает эффективность травления. Как только слой AlGaN подвергается воздействию плазмы, фтор реагирует с алюминием с образованием барьера AlF_3 на поверхности.

В процессе формирования омических контактов был проведен ряд экспериментов по травлению в индуктивно-связанной плазме с различными ICP и RF мощностью, давлением в камере, потоками SF_6 и BCl_3 . Изучено влияние различных факторов на процесс ПХТ.

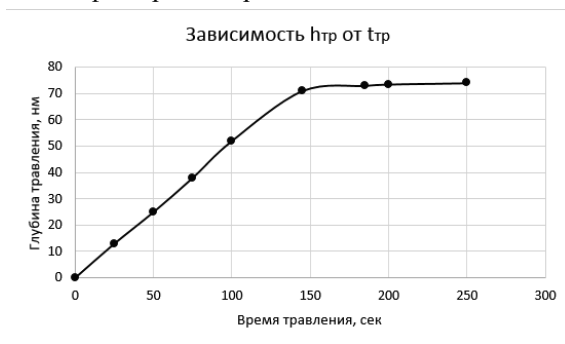


Рис.1. Зависимость глубины травления от времени травления

По результатам экспериментов был выбран наиболее оптимальный режим ПХТ, график глубины травления ($h_{\text{тр}}$) от времени травления ($t_{\text{тр}}$) по этому режиму представлен на рис.1. Из графика видно, что после травливания 70 нм гетероструктуры скорость травления резко падает, что соответствует переходу между р-GaN и AlGaN. Селективность травления р-GaN по отношению к AlGaN составила 16. Глубина травления контролировалось с помощью оптического профилометра.

Литература

1. V.I. Egorkin et al., Proc. Univ. Electronics, **25**(5), 391–401 (2020).

СВЧ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ РЕЗОНАНСНО ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ GaAs/AlAs

^{}А.С. Соболев¹, М.А. Майтама², Е.А. Климов², А.Ю. Павлов², Д.С. Пономарев²,
Р.А.Хабибуллин²*

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

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова
117105, г. Москва, Нагорный проезд, д.7, стр.5

MICROWAVE CHARACTERIZATION OF GaAs/AlAs RESONANT TUNNELING DIODES

*A.S. Sobolev¹, M.A. Maytama², E.A. Klimov², A.Yu. Pavlov², D.S. Ponomarev²,
R.A. Khabibullin²*

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

²Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, RAS,
Nagorny pr., 7/5, 117105, Moscow, Russia

We have fabricated and tested a number of double barrier heterostructures, the so-called resonant tunneling diodes (RTDs) embedded into a coplanar lines. Reflection coefficient from the RTDs was experimentally measured on chip up to the frequency 67 GHz that made possible to determine a lumped element equivalent circuit. This circuit allows us to integrate RTD into more complex electromagnetic structures.

Двухбарьерные гетероструктуры, т.н. резонансно-туннельные диоды (РТД) [1] обладают N-образной вольт-амперной характеристикой с отрицательной дифференциальной проводимостью и являются перспективными элементами для создания генераторов субмм и терагерцового диапазонов [2–3]. Нами были изготовлены и изучены GaAs/AlGaAs РТД, диаметром 10 мкм, встроенные в копланарную линию передач, что позволило с высокой точностью измерить коэффициент отражения до частоты 67 ГГц при помощи СВЧ-зондов. Эпитаксиальная структура диода выращена на полуизолирующей подложке GaAs (001) с p+ GaAs коллектором и эмиттером, легированными до $2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Верхний и нижний барьеры образованы слоями i-AlAs, толщиной 2 нм и 2.3 нм соответственно, а квантовая яма – слоем i-GaAs, толщиной 4.5 нм. На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика двух диодов включенных параллельно в копланарную линию.

Участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) содержит характерный изгиб, свидетельствующий о внутренних

осцилляциях. Измерение коэффициента отражения, S_{11} параметра, в широком частотном диапазоне позволяет с высокой точностью измерить комплексный импеданс Z двух параллельных диодов и подобрать параметры эквивалентной схемы, которая необходима для интеграции диода во внешнюю электродинамическую цепь [4] (см. вставку на рис. 1). Схема содержит дифференциальное сопротивление R_d , квантовую индуктивность L_q , емкость туннельных барьеров C , потери в подводящих электродах r и их индуктивность L_g . Удалось подобрать такие значения параметров схемы, которые обеспечивают хорошее совпадение расчетных и экспериментально измеренных кривых комплексного импеданса Z во всем частотном диапазоне для разных напряжений смещения, когда меняется только величина R_d , которая соответствующая рабочей точке и вычисляется из ВАХ.

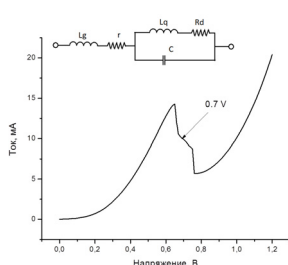


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика двух параллельных РТД и эквивалентная схема единичного диода

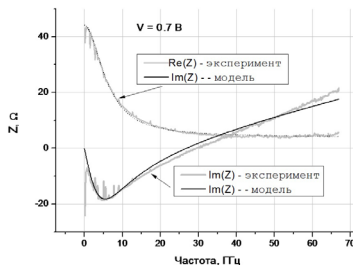


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости импеданса РТД в рабочей точке с ОДС

На рис. 2 показаны экспериментальные и теоретические зависимости комплексного импеданса Z , полученные для напряжения 0.7 В, в середине участка ВАХ с ОДС, при $L_q = L_g = 0.05$ нГн, $C = 0.7$ пФ и $r = 4$ Ом. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-22-00767.

Литература

1. H. Mizuta and T. Tanoue, The Physics and Applications of Resonant Tunneling Diodes, Cambridge University Press, Cambridge (1995).
2. T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki and M. Asada, Appl. Phys. Express **9**, 024101 (2016).
3. Kasagi K, Suzuki S, Asada M., J. Appl. Phys. **125**, 151601, (2019).
4. R. Morariu, J. Wang, A. C. Cornescu, et al., IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **67**(11), 4332–4340 (2019).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ В МЕМРИСТОРАХ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА ГЕРМАНИЯ

А.Н. Алёшин¹, Н.В. Зенченко¹, О.А. Рубан¹

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр.5, e-mail: myx.05@mail.ru

FEATURES OF THE FORMATION OF CONDUCTIVE CHANNELS IN MEMRISTORS BASED ON GERMANIUM SELENIDE

A.N. Aleshin¹, N.V. Zenchenko¹, O.A. Ruban¹

¹Institute of ultrahigh frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorny Drive 7, build. 5, e-mail: myx.05@mail.ru

Experimental data are presented on the measurement of resistance and electrical conductivity in the low-resistance mode of operation of a memristor based on germanium selenide with a self-forming conductive channel in the range of switching frequencies and temperatures. In the frequency experiment, the influence of the switching frequency was carried out at room temperature in the range of 1÷10.000 Hz. An experiment to study the effect of temperature on resistance and electrical conductivity was carried out in the temperature range of -10÷65 °C at a switching frequency of 10 Hz. The ultimate goal of the work was to determine the activation energy of the formation of a conductive channel. It is shown that in the temperature range of 22÷65 °C, the electrical conductivity obeys the Arrhenius law with an activation energy of 0.19 eV; at temperatures below room temperature, the electrical conductivity is insensitive to temperature changes. The reasons for the low value of the activation energy are discussed.

Приведены экспериментальные данные по измерению сопротивления и электропроводности в низкоомном режиме работы мемристора на основе селенида германия с самоформирующимся токопроводящим каналом в диапазоне частот переключения и температур. В частотном эксперименте влияние частоты переключений проводилось при комнатной температуре в диапазоне 1÷10000 Гц. Эксперимент по изучению воздействия температуры на сопротивление и электропроводность проводился в интервале температур -10÷65 °C при частоте переключений 10 Гц. Конечной целью работы явилось определение энергии активации образования токопроводящего канала. Показано, что в диапазоне температур 22÷65 °C электропроводность подчиняется закону Аррениуса с энергией активации, равной 0.19 эВ; при температурах ниже комнатной величина электропроводности

малочувствительна к изменению температуры. Причины малой величины энергии активации обсуждаются.

Результаты частотного эксперимента наиболее полно отражает рис. 1, на котором в полулогарифмических осях представлены выявленные зависимости между временем рабочего цикла мемристора – величиной, обратной частоте переключения и электропроводностью. Видно, что между величиной электропроводности и существует линейное соотношение.

Результаты измерения электропроводности в координатах Аррениуса в интервале температур $22 \div 65^\circ\text{C}$ показаны на рис. 2.

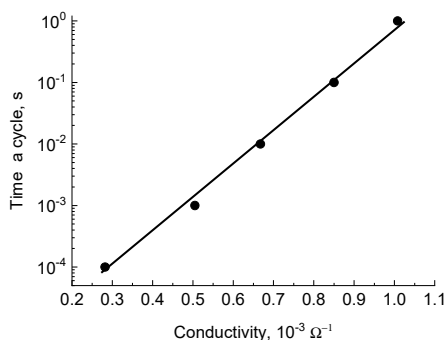


Рис. 1. Полулогарифмическая зависимость времени рабочего цикла мемристора от электропроводности

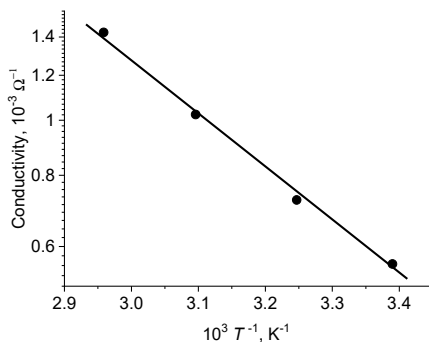


Рис. 2. Закона Аррениуса для электропроводности

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-29-03003 МК.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАНАРИЗАЦИИ ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУР РАДИОФОТОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

**А.В. Аврамчук, А.Р. Давлятшина, Ю.А. Тертыйшина, А.Н. Виниченко, И.С. Василевский*

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

FEATURES OF TECHNOLOGY OF PLANARIATION OF COMB STRUCTURES OF RADIO-PHOTONIC COMPONENTS

**A.V. Avramchuk, A.R. Davlyatshina, U.A. Tertyshnaya, A.N. Vinichenko, I.S. Vasil'evskii*

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

In this work, we studied planarization process of the surface of Mach-Zehnder modulator waveguides with a BCB polymer. SEM studies shows that a decrease in the concentration of BCB in a solution makes it possible to obtain the required layer thickness for planarization of waveguides, while the surface roughness is 5 nm, after dry etching to thinning BCB to the level of ridges.

При производстве модуляторов Маха-Цендера возникает проблема пассивации частей модулятора на различных уровнях относительно подложки, а именно необходимость создать плавный переход между волноводами модулятора и 3D элементами ввода-вывода излучения, разница высот которых составляет порядка 3 мкм. Также в данной технологии необходимо провести утонение планаризирующего слоя до уровня волновода.

В данной работе структуры двух типов волноводов с высотой 2 мкм и 5 мкм, покрывались бензоциклобутеном (BCB) Cyclotene™ 3022, как с исходной концентрацией BCB марки 3022, так и при различном разбавлении полимера растворителем – мезитилом. Нанесение производилось методом центрифугирования. Для полной полимеризации образцы выдерживались при 280 градусах Цельсия в течении 2 часов. По оценке толщины, методом профилометрии, пленка BCB, в котором концентрации растворителя не изменена, имела толщину $d = 13$ мкм. В результате утонения данного образца методом плазмохимического травления до вскрытия гребня волновода высотой 5 мкм обнаружено, что шероховатость (RMS) поверхности BCB составила ~ 80 нм. Увеличение % содержания мезитилена в BCB (6:1) позволило получить пленки толщиной $d = 4.5$ и 7.5 мкм, для волноводов 2 мкм и 5 мкм, соответственно. В результате травления ~ 2.5 мкм BCB шероховатость поверхности не превышала ~ 5

нм. Исследование качества планаризации проводилось путем определения профиля поверхности ВСВ методом профилометрии, а также методом растровой электронной микроскопии визуально оценивалось растекание полимера по поверхности волноводов (рис. 1).

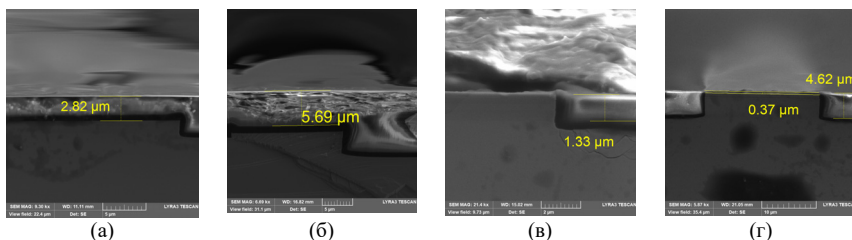


Рис. 1. Профиль ВСВ, растворенного 1:6 в мезитилене, на структурах волноводов модулятора Маха-Цендера высотой 2 мкм (а), 5 мкм (б); после травления волновода 2 мкм (в), 5 мкм (г)

По результатам исследования профиля поверхности волноводов выявлено, что ширина профиля, образованного полимером, составляет ~ 30 мкм, при этом ширина гребней в данной топологии 20 мкм, а высота уровня полимерного слоя над гребнями относительно уровня ВСВ на поле составила не более 150 нм. Для исследования адгезионных качеств по утоненной пленке ВСВ осажден металл Ti/Cu толщиной 20/1000 нм, соответственно. Проведен скретч-тест, результат оптической микроскопии которого представлен на рис. 2. Показано, что после механического воздействия на пленку Ti/Cu, не наблюдается отслоение металла.

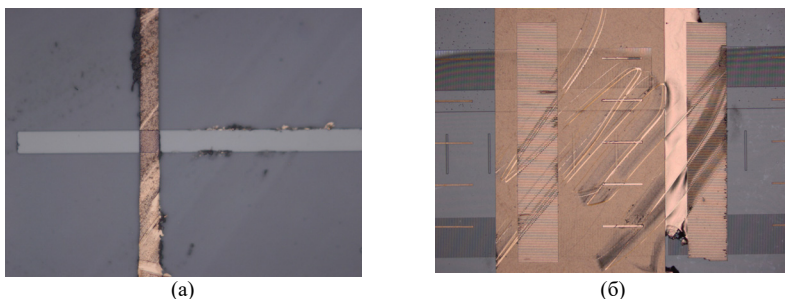


Рис. 2. Микроскопическое изображение пленки Cu/ Ti, осажденной по ВСВ утонённого до уровня волновода

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ГАЛЛИЯ

**К.С. Гришаков*

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

MODELING AND OPTIMIZATION OF RESONANT TUNNELING DIODES BASED ON GALLIUM NITRIDES

**K.S. Grishakov*

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: ksgrishakov@mephi.ru

Calculations of the current-voltage characteristics of resonant tunneling diodes based on GaN, as well as various transient processes caused by rapid voltage changes, were carried out using the numerical solution of a non-stationary system of Schrodinger-Poisson equations with exact open boundary conditions. The thickness of the spacer layers was optimized to increase the main static characteristics, such as the peak current value and the peak-valley ratio. A comparison with similar results for resonant tunneling structures based on In-GaAlAs is carried out.

Резонансно-туннельный диод (РТД) – двухбарьерная наноструктура (пример слоевой структуры GaN РТД изображен на рис. 1), работающая на квантовых принципах резонансного туннелирования.

200 нм n-GaN $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
5 нм u-GaN
1.5 нм u-AlN
2.5 нм u-GaN
1.5 нм u-AlN
12 нм u-GaN
200 нм n-GaN $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Рис. 1. Слое­вая структура GaN РТД

Несмотря на относительную простоту структуры РТД имеет множество уникальных особенностей, определяющих возможности его применения. РТД может использоваться: (1) в качестве генераторов и усилителей электромагнитного излучения (в том числе в ТГц диапазоне частот) за счет наличия области отрицательной дифференциальной проводимости на вольт-амперной характеристике; (2) для детектирования электромагнитного излучения (в том числе в ТГц диапазоне частот) за счет чувствительности

вольт-амперной характеристики к высокочастотному переменному электрическому напряжению; (3) в качестве сверхбыстродействующих переключателей (времена переключения порядка пико секунд и ниже).

Для создания РТД в основном использовались соединения InGaAlAs. Сравнительные данные по частоте и мощности генерации таких РТД с другими устройствами, являющимися претендентами на роль генераторов

терагерцового излучения приведены в работе [1]. К настоящему моменту на одиночных резонансно-туннельных диодах достигнута максимальная частота генерации 2 ТГц, однако мощность генерации составляет всего лишь ~ 1 мкВт. Таким образом, хотя на РТД экспериментально достигнуты высокие частоты генерации (рекордные для устройств электроники), мощности генерации одиночных РТД остаются недостаточными для практических применений.

Одним из путей решения проблемы, связанной с низкой мощностью генерации РТД на высоких частотах, является использование гетероструктур на основе нитридов галлия. В ранних экспериментальных работах возникали существенные проблемы с повторяемостью результатов измерений, отсутствием выраженной области отрицательной дифференциальной проводимости на вольт-амперных характеристиках GaN резонансно-туннельных диодов и др. Это было связано с высокой чувствительностью выходных характеристик РТД к качеству эпитаксиального роста (плотности дислокаций, зарядовые ловушки и т. д.). Только к 2020 году удалось экспериментально получить повторяемые ВАХ с выраженной областью отрицательной дифференциальной проводимости (отношение пик-долина порядка 2 при комнатной температуре) [2].

Теоретические работы по GaN РТД в настоящее время ограничиваются исследованиями статических характеристик и направлены в большей степени на поиски путей устранения эффектов поляризации, которые делают барьеры квантовой ямы РТД несимметричными, что понижает коэффициент прохождения через такую структуру, а следовательно, и величину пикового тока.

В настоящей работе с использованием численного решения нестационарной системы уравнений Шредингера и Пуассона с точными открытыми граничными условиями были проведены расчеты вольт-амперных характеристик РТД на основе GaN, а также различных переходных процессов, вызванных быстрыми изменениями напряжения. Проведена оптимизация толщины спейсерных слоев для увеличения основных статических характеристик, таких как пиковое значение тока и отношение пик-долина. Проведено сопоставление с аналогичными результатами для резонансно-туннельных структур на основе InGaAlAs.

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» НИЯУ МИФИ.

Литература

1. M. Asada, S. Suzuki, *Sensors*, **21**, 1384 (2021).
2. T.A. Growden et al., *Appl. Phys. Lett.*, **116**, 113501 (2020).

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МДП-СЕНСОРОВ: СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОГО И МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

**М.О. Этрекова, А.В. Литвинов, Н.Н. Самотаев, А.В. Казиев, А.Т. Горевой*

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

FORMATION OF GAS-SENSITIVE MIS SENSORS ELECTRODES: COMPARISON OF PULSED LASER DEPOSITION AND MAGNETRON SPUTTERING METHODS

**M.O. Etrekova, A.V. Litvinov, N.N. Samotaev, A.V. Kaziev, A.T. Gorevoy*

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

The effect of pulsed laser deposition (PLD) and magnetron sputtering (MS) at the thin film platinum electrode formation and corresponding gas-sensitive properties of capacitive MIS sensors are studied.

Известно [1], что для формирования долговременно стабильных тонких пленок методами напыления в вакууме энергия осаждаемых на подложку частиц должна находиться в диапазоне от 10 до 100 эВ. Этим требованиям в полной мере отвечают методы импульсного лазерного и магнетронного распыления, применяемые в том числе и для решения технологических задач сенсорного газового анализа [2, 3].

Для сравнительного исследования влияния методов формирования верхнего электрода на газочувствительные свойства емкостных МДП-сенсоров [4] были изготовлены МДП-структуры типа Pt-SiO₂-p-Si, отличающиеся лишь методом напыления Pt-электрода.

Результаты микроскопических исследований морфологии электродов представлены на рис. 1 (а, б), вольт-фарадные характеристики (ВФХ) 4-х тестовых образцов МДП-сенсоров (по 2 экз. каждого типа) – на рис. 1 (в).

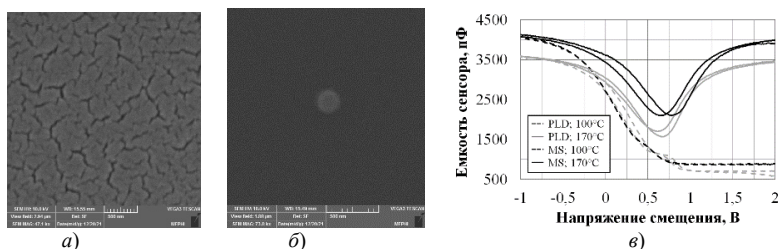


Рис. 1. РЭМ-фотография поверхности Pt-электрода, сформированного разными методами напыления в вакууме (масштаб 500 нм): MS (а) и PLD (б); ВФХ экспериментальных МДП-сенсоров при рабочей температуре 100 и 170°C (в)

Результаты исследования газочувствительных свойств датчиков, изготовленных на основе экспериментальных МДП-структур, по водороду и аммиаку представлены на рис. 2.

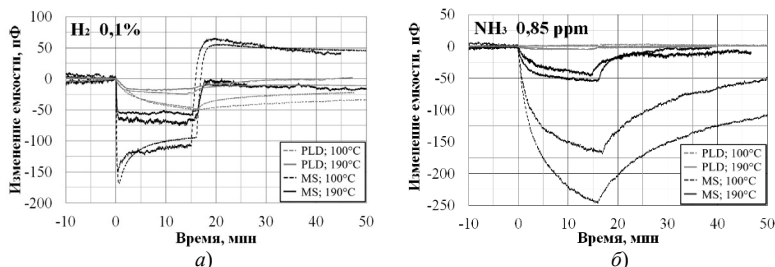


Рис. 2. Динамика изменения емкости МДП-сенсора под действием газов: водорода с концентрацией 0,1 % об. д. в атмосферном воздухе (а) и аммиака с концентрацией 0,85 ppm в сухом воздухе (б). Длительность подачи газов – 15 мин

Как видно, платиновая пленка электрода, см. рис. 1, полученная методом MS, в отличие от Pt-электрода, сформированного посредством PLD, является пористой, что дает возможность молекулам газа свободно проникать вглубь до границы раздела металл-диэлектрик, которая во многом определяет свойства чувствительности МДП-сенсоров к газам [5]. Однако чувствительность к H_2 хоть и в разы меньше, см. рис. 2 (а), но наблюдается также и в случае сплошной Pt-пленки, при этом время реагирования на концентрацию значительно больше. Для более крупной молекулы NH_3 чувствительность сенсора с PLD-электродом появляется только при повышенной температуре, рис. 2 (б), что может указывать на начало каталитической реакции на поверхности платины с образованием H_2 [6]. Таким образом, показано, что метод напыления сенсорных слоев газовых датчиков оказывает влияние на механизм газовой чувствительности и может служить инструментом регулирования уровня чувствительности и селективности сенсоров.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-79-10230). This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 18-79-10230.

Литература

1. G.K. Hubler, Comparison of Vacuum Deposition Techniques, N.Y.: Wiley (1994).
2. А.М. Гуляев и др., Сенсор, 2 (2001).
3. J. Huotari et al., Procedia Engineering, 168 (2017).
4. B. Bolodurin et al., Russian Journal of General Chemistry, 88, 12 (2018).
5. M. Etrekova et al., Proceedings of the conference YETI-2020 (2021).
6. I. Lundstrom et al., Sensors & Actuators, B: Chemical, 121 (2007).

ВЫСОКОТОЧНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 0.15 мкм МНЕМТ InAlAs/InGaAs ТРАНЗИСТОРА

В.В. Локотко, И.С. Васильевский, Н.И. Каргин

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

HIGH ACCURACY MODELING OF 0.15 mkm MHEMT InAlAs/InGaAs TRANSISTOR

V.V. Lokotko, I.S. Vasil'evskii, N.I. Kargin

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

In this work, internal parameters of a HEMT InAlAs/InGaAs Transistor were calculated by approximation admittance. Accuracy value E was less than 1.5% at an operating frequency range from 1 to 50 GHz. Furthermore, an analysis of transistor internal parameters influence was showing that simulation accuracy doesn't depend on the resistance gate-source and gate-drain values.

При разработке малошумящих СВЧ усилителей необходимо иметь высокоточные модели поведения S -параметров транзисторов. Целью данной работы являлась оценка точности моделирования S -параметров МНЕМТ транзистора на основе InAlAs/InGaAs.

Изготовленные транзисторы имели длину затвора 0.15 мкм. Исследования S -параметров в диапазоне частот от 1 до 50 ГГц. По результатам анализа вольтамперных характеристик и S -параметров были определены основные параметры транзистора.

Внутренние параметры транзистора определялись методом аппроксимации частотных зависимостей адмиттанса [1, 2] нелинейной модели S -параметров транзистора по общей формуле:

$$f_i(U_{ds}, U_{gs}) = x_{i0}(1 + \tanh(x_{i1} U_{gs} + x_{i2} U_{gs}^2 + x_{i3} U_{igs}^3))(1 + \tanh(x_{i4} U_{ds} + x_{i5})),$$

где $f_i(U_{ds}, U_{gs})$ – функция зависимости внутренних параметров транзистора ($i = R_{gs}, R_{gd}, R_{ds}, C_{gs}, C_{gd}, C_{ds}, \tau, g_m$) от приложенных напряжений питания U_{gs} и смещения U_{ds} ; $x_{i0} \dots x_{i5}$ – оптимизационные параметры аппроксимации измерений S -параметров.

Точность модели определяется расчетом среднеквадратичной ошибки отклонения измеренных и смоделированных S -параметров ($E, \%$). Максимальное рассчитанное значение ошибки моделирования составило вели-

чину порядка 1.5% в частотном диапазоне от 0.1 до 50 ГГц. С целью определения факторов, оказывающих доминирующее влияние на точность моделирования S -параметров транзистора, было проведено вариационное исследование точности в диапазоне $\pm 20\%$ от номинального значения внутренних параметров. На основе этих данных были получены двумерные поверхности, описывающие зависимости ошибки E (%) от значений внутренних параметров транзистора в частотном диапазоне от 0.1 до 50 ГГц (рис. 1). Под поверхностью построены изолинии функции E от соответствующих варьируемых пар параметров – сопротивления R_{gd} и емкости C_{gd} сток-затвора; сопротивления R_{gs} и емкости C_{gs} исток-затвора; сопротивления R_{ds} и емкости C_{ds} сток-истока; проводимости g_m и времени задержки τ .

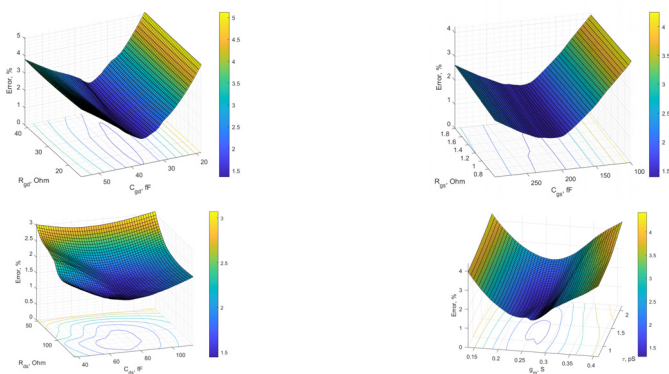


Рис. 1. Зависимости ошибки моделирования от значений внутренних параметров транзистора

В результате проведенных исследований было установлено, что комбинация подходов [1, 2] дает точное соответствие измеренных и смоделированных S -параметров. Расчетные значения внутренних параметров транзистора советуют минимумам полученных вариационных поверхностей. Изменение значений сопротивлений R_{gs} и R_{gd} не оказывают заметного влияния на точность моделирования. Из рисунка 1 также следует, что повышение точности возможно достичь путем решения задачи оптимизации в более узком диапазоне значений.

Работа выполнена в рамках стратегического проекта СП4 НИЯУ МИФИ «Радиофотоника и квантовая сенсорика».

Литература

1. I. Angelov et al., IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech., **40**(12), 2258-2266 (1992).
2. A.A. Gorelov et al., Russian Microelectronics, **50**(3), 170-177 (2021).

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ГРАНИЦЫ
ПЕРОВСКИТА MAPbI_3 И ОКСИДА НИКЕЛЯ**

****А.К. Тучковский¹, В.А. Лабунов¹, И.А. Кашко¹, В.В. Филиппов¹***

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

**USING THIN LAYERS OF CARBON-CONTAINING MATERIALS TO IMPROVE
THE TRANSPORT PROPERTIES OF THE MAPbI_3 PEROVSKITE
AND NICKEL OXIDE INTERFACE**

****A.K.Tuchkovskii¹, V.A.Labunov¹, I.A.Kashko¹, V.V.Filippov¹***

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Republic of Belarus, 220013, Minsk, st. Petrusya Brovki 6, e-mail: tak53@mail.ru

The addition to the structure of a photovoltaic cell at the interface between the p-transport layer and perovskite of a thin (5÷10 nm) inorganic film based on two-dimensional carbon or carbon-containing materials leads to a decrease in the series resistance of the device, the recombination rate of charge carriers, and, obviously, an increase in the charge transfer rate through the interface due to its passivation.

Нанометровые слои 2-D углеродсодержащих материалов (графен, графит, и карбид бора) толщиной до 10 нм были использованы для улучшения характеристик *p*-типа транспортных слоев фотовольтаических ячеек. Слои механически или вакуумным напылением наносились на поверхность оксида никеля, граничащую с перовскитом, для ее пассивации, а затем отжигались в вакууме при 420 °С. Гидрофобные поверхности углеродных материалов обрабатывались раствором йодистого азота в диэтиловом эфире. Такая обработка позволила получить поверхностные нанометровые слои с хорошими гидрофильными свойствами и хорошей адгезией. Толщина слоев оценивалась эллипсометрически.

Высокопроводящие прозрачные пленки NiO_x , допированные алюминием (3% вес.), были получены ВЧ магнетронным распылением из никелевой мишени с алюминиевыми вставками и последующим термическим отжигом в среде кислорода при 300 °С.

Были сформированы инвертированные фотоэлектрические ячейки следующей архитектуры: стеклянная подложка /FTO/ NiO_x :Al/углеродный материал/перовскит ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)/ TiO_x /Ti/Al. Особенность формирования ячеек заключалась в изготовлении двух ее составляющих частей с после-

дующим их соединением. Одна часть представляла собой стеклянную подложку со слоями FTO/ NiO_x/Al /углеродный материал/перовскит ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), а вторая формировалась на металлической фольге и представляла структуру $\text{TiO}_x/\text{Ti}/\text{Al}$.

Перовскит наносился центрифугированием раствора, и окончательная его кристаллизация завершалась после соединения под небольшим давлением обеих частей ячейки.

Во всех испытанных ячейках напряжение холостого хода находилось в интервале $600 \div 650$ мВ. Плотность тока короткого замыкания для ячеек со слоями из разных углеродных материалов лежала в диапазоне $14 \div 19$ mA/cm^2 , что на $10 \div 40\%$ превышало ее значение для ячеек без углеродсодержащего пассивирующего слоя. Наилучшие фотовольтаические параметры показала ячейка с пассивацией поверхности оксида никеля графитом.

Ранее было показано [1], что оксид графена является перспективным межфазным материалом. Из проведенного исследования следует, что подавление рекомбинации электронов и улучшение транспортных свойств границы перовскита присуще и другим углеродным материалам. Во всех случаях механизмы, приводящие к улучшению параметров ячеек, идентичны.

Кривые измеренных ВАХ фотовольтаических ячеек при облучении имитатором солнечного спектра мощностью $100 \text{ мВт}/\text{cm}^2$ (AM 1.5) представлены на рис. 1.

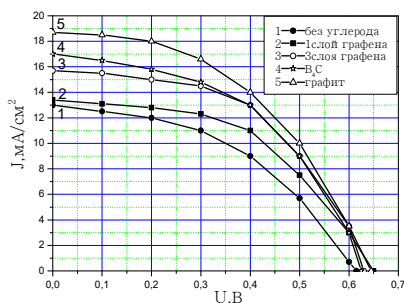


Рис. 1. ВАХ солнечных ячеек с пассивацией границы оксид никеля-перовскит различными углеродными материалами

Литература

1. Q.-D. Yanget et al., J. Mater. Chem. A, **5**, 9852, (2017).

**СТАБИЛЬНОСТЬ КВАНТОВОГО ХОЛЛОВСКОГО СОСТОЯНИЯ
В ДВОЙНЫХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ ПРИ $\nu=1$**

****А.А. Васильченко***

Национальный исследовательский Томский государственный университет
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 36, e-mail: a_vas2002@mail.ru

**STABILITY OF THE QUANTUM HALL STATE
IN DOUBLE QUANTUM WELLS AT $\nu=1$**

****A.A. Vasilchenko***

National Research Tomsk State University
Russia, 634050, Tomsk, 36 Lenin Ave., e-mail: a_vas2002@mail.ru

A phase diagram of the transition to a quantum Hall state in double quantum dots is constructed with a filling factor of the Landau level equal to one. It is shown that for a zero tunnel gap, the quantum Hall state can be stable. The influence of the impurity potential on the stability condition of the quantum Hall state is studied.

Экспериментальные работы [1, 2] по квантовому холловскому состоянию (КХС) при факторе заполнения $\nu = 1$ в двуслойных двумерных электронных системах в GaAs показали ряд поразительных явлений. Если расстояние d между слоями большое, то слои ведут себя независимо с фактором заполнения $\nu = 1/2$ для каждого слоя и квантовый эффект Холла не наблюдается. С уменьшением d или плотности электронов происходит фазовый переход и возникает холловское плато с фактором заполнения $\nu = 1$. Необычность этого явления заключается в том, что холловское плато с $\nu = 1$ сохраняется при нулевой туннельной щели для $d/L < 1,7$ [2] (L – магнитная длина).

В настоящей работе построена количественная теория стабильности КХС при $\nu = 1$ в системе двух вертикально-связанных квантовых точек с большим числом электронов N . Используется теория функционала плотности для изучения электронных свойств двух вертикально-связанных двумерных квантовых точек в перпендикулярном магнитном поле. Одинаковые квантовые точки разделены барьером и находятся на расстоянии d друг от друга. Уровни энергии симметричных и антисимметричных состояний разделены туннельной щелью Δ , изоспин определяется как $I = (N_s - N_a)/2$ (N_s (N_a) – число электронов в подзоне симметричных (антисимметричных) состояниях).

В случае одинаковых квантовых точек уравнение Шредингера из системы уравнений Кона-Шама решается для электронов, находящихся в одной квантовой точке. Все расчеты проводились для GaAs квантовых точек.

Изучался переход из КХС в состояние с $N_a = 1$ и произвольным угловым моментом электрона, при котором вся система имеет минимальную энергию. Фазовая диаграмма перехода в КХС приведена на рис. 1. Видно, что при небольших магнитных полях (низких плотностях электронов) КХС является энергетически выгодным при любых значениях Δ . Были проведены вычисления при $\Delta = 0$ для различных значений d в интервале значений от 0.5 до 1. Результаты этих вычислений показали, что при изменении d величина магнитного поля, при котором КХС является стабильным, сильно изменяется. При этом отношение d/L изменяется слабо (около 15 процентов) и КХС всегда является стабильным при $d/L < 0.7$ (эксперименты дают значение $d/L < 2$ [1] и $d/L < 1.7$ [2]). Такое различие, по-видимому, связано с влиянием примесного потенциала и неоднородностей на электронные свойства двойных слоев.

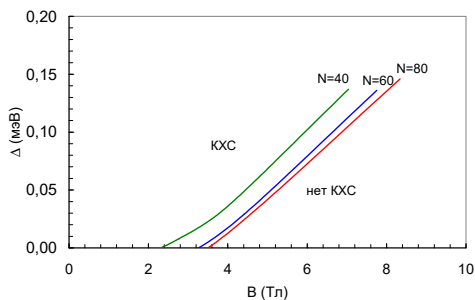


Рис. 1. Зависимость величины минимальной туннельной щели от магнитного поля ($d=1$)

Изучено влияние примесного потенциала на свойства перехода в КХС. В качестве примесного потенциала взята точечная примесь. Результаты вычислений показали, что с учетом примесного потенциала КХС всегда является стабильным при $d/L < 3$.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0721-2020-0048.

Литература

1. S.Q. Murphy, J.P. Eisenstein, G.S. Boebinger et al., Phys. Rev. Lett., **72**, 728 (1994).
2. M. Kellogg, I.B. Spielman, J.P. Eisenstein et al., Phys. Rev. Lett., **88**, 126804 (2002).

**СЛАБАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ВРЕМЯ ФАЗОВОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ
В СТРУКТУРАХ InGaAs/GaAs С ДВОЙНЫМИ СИЛЬНО-СВЯЗАННЫМИ
КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

****С.В. Гудина¹, Ю.Г. Арапов¹, В.Н. Неверов¹, А.П. Савельев¹, Н.Г. Шелушинина¹,
М.В. Якунин¹, Б.Н. Звонков²***

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
620108, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, Россия, e-mail: svpopova@imp.uran.ru

²Национальный Исследовательский Нижегородский государственный университет
имени Н.И. Лобачевского,
603950, проспект Гагарина, 23, Нижний Новгород, Россия

**WEAK LOCALIZATION AND PHASE BREAKING TIME IN InGaAs/ GaAs
STRUCTURES WITH DOUBLE STRONGLY COUPLED QUANTUM WELLS**

****S.V. Gudina¹, Yu.G. Arapov¹, V.N. Neverov¹, A.P. Savelyev¹, N.G. Shelushinina¹,
M.V. Yakunin¹, B.N. Zvonkov²***

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

²National Research Nizhniy Novgorod State University,
603950, 23, Gagarin avenue, Nizhniy Novgorod, Russia

It is measured the resistance ρ_{xx} in the magnetic field B in n-InGaAs/GaAs structures with strongly coupled double quantum wells (tunnel coupling $\Delta_{SAS} \cong 3.0$ meV) at fixed temperatures in the range $0.4 \leq T \leq 4.2$ K. Analysis of the $\rho_{xx}(B)$ within the framework of the approach developed in [1], allowed us to obtain the dependence of the phase breaking time on temperature $\tau_{\phi}(T)$. Analysis of the dependence $\tau_{\phi}(T)$ within the modern theoretical concepts [see, for example, 2] is provided.

Время фазовой когерентности или время неупругого рассеяния имеет большое значение для анализа процессов переноса в полупроводниковых и металлических мезоскопических образцах. По сути, оно устанавливает масштаб, в котором квантово-механические свойства микроскопической системы переходят к классическому поведению, наблюдаемому на макроскопических объектах. Изучение квантовой когерентности привлекает значительное внимание, мотивированное как вопросами фундаментального научного интереса, так и возможностью использования твердотельных электронных устройств для хранения квантовой информации. Механизмы, ответственные за неупругие процессы, определяются размерностью системы, уровнем беспорядка и температурой.

Свойства 2D систем контролируются несколькими характерными масштабами длины. При нулевой температуре неупорядоченная волновая

функция локализована на масштабе длины локализации. Реальные эксперименты проводятся при отличной от нуля температуре, и существенной становится длина, на которой электроны сохраняют фазовую когерентность. В полупроводниковых 2D-системах при низких температурах неупругость электрон-электронного взаимодействия является основным источником процессов сбоя фазы τ_ϕ . Внешнее поперечное магнитное поле B разрушает квантовую интерференцию и влияет на локализацию, так что в конкуренцию длин вступает еще и магнитная длина. В малых магнитных полях отрицательное магнетосопротивление, возникающее из-за подавления квантовой интерференции, является известным проявлением слабой локализации и служит инструментом изучения процессов фазовой когерентности и определения времени сбоя фазы и его температурной зависимости.

В двойных туннельно-связанных квантовых ямах n -InGaAs/GaAs были измерены зависимости сопротивления от магнитного поля при фиксированных температурах в интервале $0.4 \leq T \leq 4.2$ К. Анализ полученных зависимостей в рамках подхода, развитого в [1], позволил получить температурную зависимость времени фазовой когерентности $\tau_\phi(T)$, которая была проанализирована в рамках современных теоретических представлений [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Электрон», Г.р.№ АААА-А18-118020190098-5, при поддержке РФФИ и Свердловской области в рамках научного проекта 20-42-660004.

Литература

1. S. Hikami, A. Larkin, and Y. Nagaoka, Prog. Theor. Phys., **63**, 707 (1980).
2. G.M. Minkov, A.V. Germanenko, I.V. Gornyi, Phys. Rev. B, **70**, 245423 (2004).

**ВЛИЯНИЕ ПОНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ НА ЗОННУЮ СТРУКТУРУ
ДИСУЛЬФИДА РЕНИЯ**

А.В. Баглов^{1,2}, *Л.С. Хорощко^{1,2}

¹Белорусский государственный университет

Беларусь, 220030, г. Минск, Проспект Независимости, дом 4, e-mail: khoroshko@bsu.by

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: baglov@bsu.by

**INFLUENCE DIMENSION REDUCING ON BANDSTRUCTURE OF A RHENIUM
DISULFIDE**

A.V. Baglov^{1,2}, *L.S. Khoroshko^{1,2}

¹Belarusian State University

Belarus, 220030 Minsk, Nezavisimosti Av. 44, e-mail: khoroshko@bsu.by

²Belarusian State University Informatics and Radioelectronics

Belarus, 220013 Minsk, Browka P. str. 6, e-mail: baglov@bsu.by

This paper presents how reducing dimension influences electronic properties of a rhenium disulfide were studied within density functional theory and local density approximation. Shown that ReS₂ slab has indirect bandgap which increases in comparing direct bandgap in bulk material from 1.26 eV to 1.44 eV. These results can be explained by changing Re–S bond length and S–Re–S angles in a low-symmetry primitive cell of ReS₂, when interlayer van der Waals interaction disappears. It allows supposing that this material in 2D form can have interesting transport properties for nanoelectronics components.

В настоящее время двумерные материалы находят практическое применение для создания разнообразных устройств и их компонентов: от композитных электродов литий-ионных батарей до транзисторов субнанометрового размера [1]. В отличие от хорошо исследованных двумерных материалов, таких как графен, дисульфиды и дихалькогениды молибдена и вольфрама, опубликованные экспериментальные результаты для дисульфида рения ReS₂, в основном, связаны с исследованием его в объемном состоянии в контексте создания солнечных элементов, (фото)катализаторов, электронных компонентов и т.д. Известно, что для слоистых материалов гексагональной сингонии переход от объемного (трехмерного) состояния к двумерному сопровождается изменением их свойств, обусловленных фундаментальными изменениями в электронном строении таких материалов. Учитывая, что дихалькогениды рения кристаллизуются в низкосимметричной триклинной сингонии, исследование их в виде двумерных кристаллов представляет большой интерес.

Мы исследовали зонную структуру дисульфида рения триклинной сингонии в объемном и двумерном состоянии (рис. 1) *ab-initio* методами в рамках теории функционала плотности и теории псевдопотенциала, реализованных в пакете *OpenMX* [2, 3]. Расчеты проведены с использованием приближения локальной плотности, т.к. в его рамках обычно удается корректно описать структурные и электронные свойства слоистых материалов с выраженным Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием, в том числе MoS_2 и WS_2 , что позволит также провести корректное сравнение результатов для этих трех дисульфидов.

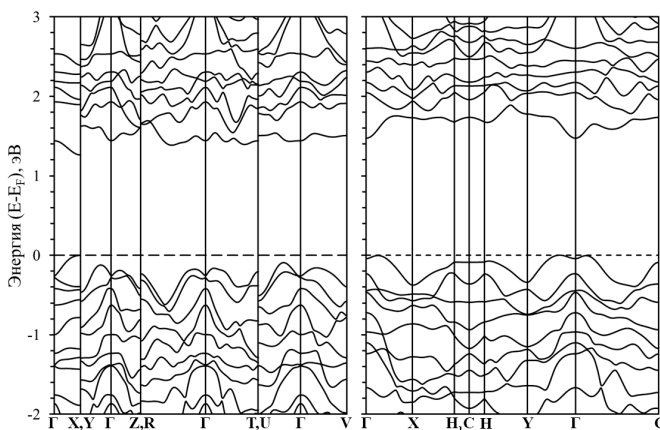


Рис. 1. Зонная структура объемного (слева) и двумерного (справа) ReS_2

Для объемного ReS_2 ширина запрещенной зоны составляет 1.26 эВ, что хорошо согласуется с обычно принимаемым в литературе значением в 1.4 эВ, а наличие прямого перехода в точке X для объемного ReS_2 согласуется с спектроскопическими наблюдениями. Понижение размерности приводит к увеличению запрещенной зоны до 1.44 эВ с одновременным изменением дисперсии на отрезке $\Gamma - X$, смещением положения максимума валентной зоны из точки X в направлении к точке Γ , чего не наблюдается в случае MoS_2 и WS_2 . Такое поведение может быть обусловлено низкосимметричной ячейкой ReS_2 и позволяет предполагать наличие анизотропии электрофизических свойств у ReS_2 .

Литература

1. F. Wu et al., Nature, **603**, 259-264 (2022).
2. T. Ozaki, Phys. Rev. B, **67**, 155108 (2003).
3. T. Ozaki, Phys. Rev. B, **69**, 195113 (2004).

**ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ АЗОТ-ВАКАНСИЯ
В ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ АЛМАЗНОЙ ПЛЕНКЕ МЕТОДОМ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

****М.О. Смирнова^{1,2}, Д.М. Арзамасцева¹, А.С. Гусев¹, Н.И. Каргин¹, М.М. Калошин¹,
А.Т. Салказанов¹, А.А. Тимофеев¹, А.Б. Ранов¹***

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: mosmironova@yandex.ru

²Межрегиональное общественное учреждение «Институт Инженерной Физики»

Россия, 142210, Московская обл., г. Серпухов, Б. Ударный пер., д. 1а

**FORMATION OF NITROGEN VACANCY COLOR CENTERS IN EPITAXIAL
DIAMOND FILM BY LOW ENERGY ELECTRON IRRADIATION**

****M.O. Smirnova^{1,2}, D.M. Arzamastseva¹, A.S. Gusev¹, N.I. Kargin¹, A.T. Salkazanov¹,
A.A. Timofeev¹, A.B. Ranov¹***

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

Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: mosmironova@yandex.ru

²Interregional public organization «Institute of Engineering Physics»

Russia, 142210, Moscow Region, Serpukhov, B. Udamy per., 1a

The nitrogen-vacancy center (NV-center) in the diamond is a solid-state quantum system that can be used as basic element for creating quantum sensors (magnetometers) of weak magnetic fields. This paper presents the results of studying the formation of ensembles of NV centers in an epitaxial diamond film. To form vacancies on the surface of the sample, a series of low-energy electron beam irradiations with subsequent high-temperature annealing was carried out. At each step of the technological operation, using the methods of Raman scattering of light and luminescence, spectral studies of the irradiated areas were performed.

Центр окраски азот – вакансия (NV-центр) в кристаллической решетке алмаза – это твердотельная квантовая система, которая может быть использована в качестве базового элемента для создания гибридных оптических твердотельных квантовых устройств, в частности, квантовых сенсоров (магнетометров) для прецизионного измерения слабых магнитных полей [1].

Ключевым узлом магнетометра является алмаз с NV-центрами. Физические свойства и количество этих дефектов напрямую влияют на его чувствительность, т.е. чем больше концентрация NV-центров, тем выше чувствительность устройства. Характеристики дефектов напрямую определяются свойствами алмаза и способом их формирования.

Наиболее распространенный процесс получения NV-центров – это образование вакансий с помощью электронного или ионного облучения алмаза с низким содержанием азота с последующим отжигом при температурах в диапазоне от 800 °C до 1000 °C, что приводит к миграции вакансий в кристаллической решетке алмаза, и в случае встречи с атомом азота, формированию NV-центра. Если концентрация азота невысока, то дополнительные атомы азота в алмаз можно искусственно ввести путем облучения ионами азота.

В настоящей работе представлены результаты формирования ансамблей NV-центров в эпитаксиальной алмазной пленке с помощью низкоэнергетического электронного облучения. Для эксперимента использовался алмазный образец типа IIa, состоящий из подложки, выращенной методом температурного градиента при высоком давлении и высокой температуре (HPHT-TG), и алмазной пленки, полученной методом CVD. На поверхности образца была выполнена серия облучений электронным пучком с разными дозами с помощью сканирующего электронного микроскопа LYRA3. Энергия падающих электронов составляла 30 кэВ, а время экспозиции варьировалось от 0.1 с до 100 с. Далее методами комбинационного рассеяния света и люминесценции выполнялись спектральные исследования облученных областей с помощью конфокального микроскопа Confotec NR 500 [2]. Предметом поиска были спектральные линии, соответствующие дефектам: GR1 (вакансии) (742 нм) и NV-центры (637 нм) [3]. В областях с наибольшей экспозицией было выявлено присутствие дефектов GR1, но NV не было обнаружено. Для образования NV-центров было решено выполнить высокотемпературный отжиг образца. Начальные параметры отжига: температура – 800 °C и время 10 мин.

После процедуры отжига были проведены повторные спектральные измерения. По полученным результатам, в областях облучения были выявлены скопления NV-центров. Более подробные исследования параметров (например, время дефазировки) сформированных ансамблей будут выполняться методом оптически-детектируемого магнитного резонанса.

Литература

1. S. Tumanski, «Modern magnetic field sensors – a review», Prz. Elektrotechniczny, vol. 89, no. 10, pp. 1–12, 2013.
2. Kopachevsky V., Shashkov S., Gvozdev A. Confotec series Raman confocal microscopes – reliable equipment for scientific research and industry // Analitika. – 2014. – № 1(14). – p. 44–48.
3. A.M. Zaitsev, Optical properties of diamond: a data handbook, vol. 42, no. 2. 2001.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ КВАНТОВЫХ ЯМ
И СВЕРХРЕШЕТОК С ПОМОЩЬЮ НЕСТАЦИОНАРНОГО УРАВНЕНИЯ
ШРЕДИНГЕРА**

****Ю.Д. Сибирмовский, К.С. Гришаков, И.С. Васильевский***

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

**MODELING OPTICAL SPECTRA OF QUANTUM WELLS AND SUPERLATTICES
WITH TIME-DEPENDENT SCHRÖDINGER EQUATION**

****Yu.D. Sibirmovsky, K.S. Grishakov, I.S. Vasil'evskii***

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

The purpose of this work is to develop an accurate and efficient algorithm for calculating absorption and refraction spectra of semiconductor nanostructures. Unlike most of the previous methods, in this case it is proposed to solve time-dependent Schrödinger equation in position space. While such algorithms had been proposed before, the goal of this study is to find a balance between approximation and efficiency, using partial separation of variables approach. Transparent boundary conditions are developed for this purpose as well.

Корректный учет экситонных эффектов является чрезвычайно важным аспектом моделирования оптических спектров полупроводников и гетероструктур на их основе.

Для этого обычно численно решается уравнение Шредингера для электрон-дырочной пары. Его можно решать в координатном, либо в импульсном представлении, а также в стационарной или нестационарной форме. Несмотря на то, что вклад в спектры дают в основном стационарные состояния электронов и дырок, в работе [1] было показано, что можно получить аналогичный результат из нестационарного уравнения.

В этом случае диэлектрическая восприимчивость будет иметь вид:

$$\chi(\omega) \propto \frac{i}{\hbar} \int_0^\infty e^{i\omega t - \gamma t} \langle \Psi_0 | \Psi(t) \rangle dt, \quad (1)$$

$$\Psi_0 \propto \delta(z_e - z_h) \frac{\delta(r)}{2\pi r}, \quad (2)$$

где γ – однородное уширение экситонных пиков, $\Psi(t)$ – решение уравнения Шредингера, а Ψ_0 – начальное состояние, физический смысл которого заключается в том, что до возбуждения светом электрон и дырка находились в одной точке пространства.

Численное решение нестационарного уравнения Шредингера может быть реализовано при значительно меньших затратах оперативной памяти, так как не требует диагонализации больших матриц, а лишь только последовательного умножения матриц на вектор.

Еще одним преимуществом данного подхода является возможность использовать дискретные открытые граничные условия [2], которые являются более обоснованными физически и математически, чем обычно применяемые условия типа PML (perfectly matched layers).

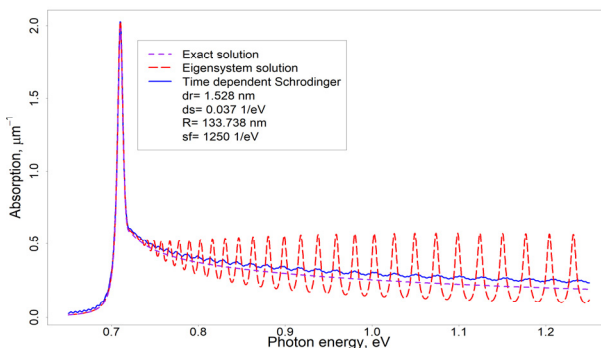


Рис. 1. Спектр поглощения узкой квантовой ямы, рассчитанный по точной аналитической формуле (exact), из стационарного ур-я Шредингера (eigensystem) с граничными условиями Дирихле, и из нестационарного с открытыми граничными условиями (time dependent)

На рис. 1 приводится сравнение решений модельной задачи о спектре поглощения электрон-дырочной пары в бесконечно узкой квантовой яме. Наблюдается хорошее согласие с точным аналитическим решением.

Несмотря на преимущества метода, его прямая реализация приводит к большим временным затратам (до нескольких суток на вычисление одного спектра). Поэтому в данной работе предлагается метод частичного разделения переменных, который сохраняет физически важные аспекты задачи, но значительно ускоряет работу алгоритма.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФАНО РФ, проект № 0723-2020-0037.

Литература

1. S. Glutsch et al., Physical Review B, **63**(8), 1–7 (2001).
2. M. Ehrhardt et al., Comm. Math. Sci., **10**(3) (2012).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ГЕТЕРОСТРУКТУР 3C-SiC/Si**

*Д.П. Борисенко, А.С. Гусев, Н.И. Каргин, Р.В. Рыжук, С.М. Рындя,
Г.К. Сафаралиев, Н.В. Сигловая, *А.О. Султанов*

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

STUDY OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF 3C-SiC/Si HETEROSTRUCTURES

*D.P. Borisenko, A.S. Gusev, N.I. Kargin, R.V. Ryzhuk, S.M. Ryndya,
G.K. Safaraliev, N.V. Siglovaya, *A.O. Sultanov*

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

This paper presents the results of studies of the electrical properties of silicon carbide layers grown by chemical vapor deposition. With the help of TLM tests, the volt-ampere characteristics of metal-semiconductor contacts were obtained. An estimated impurity concentration in silicon carbide has been obtained.

В основе исследований электрофизических параметров образцов 3C-SiC/Si находится определение переходного сопротивления контактов. В условиях контактов к тонкому слою полупроводника наиболее распространено измерение переходного сопротивления методом длинной линии (TLM – Transmission Line Method) [1, 2].

В качестве подложки для нанесения металла использовались образцы гетероструктур 3C-SiC/Si выращенных при температуре 1300 °С. На лицевой стороне пластины, к слою 3C-SiC, были сформированы структуры для измерений методом TLM (см. рисунок 1а). Для металлического контакта была выбран слой нитрид титана толщиной 50 нм, наносившийся магнетронным методом в среде азота. Обратная сторона структуры 3C-SiC/Si была равномерно покрыта слоем нитрида титана.

Толщина слоя 3C-SiC ($h=200$ нм) на порядок меньше расстояния между контактами ($5 \div 20$ мкм). В связи с этим наиболее вероятным направлением электрического тока является маршрут от входного контакта через слой 3C-SiC к подложке кремния и далее в объеме кремния в сторону выходного контакта.

TLM измерения проводились с помощью зондовой станции EP6 (Cascade Microtech) с анализатором полупроводниковых устройств B1500. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись по горизонтальной

схеме в диапазоне от -5 до +5 вольт. В результате получены омические вольт-амперные характеристики. Типичный вид вольт-амперных характеристик для разных промежутков между контактами приведен на рисунке 1б.

Оценка концентрации носителей заряда проводилась на основе результатов экспериментальных исследований удельного сопротивления контактов и приконтактного слоя.

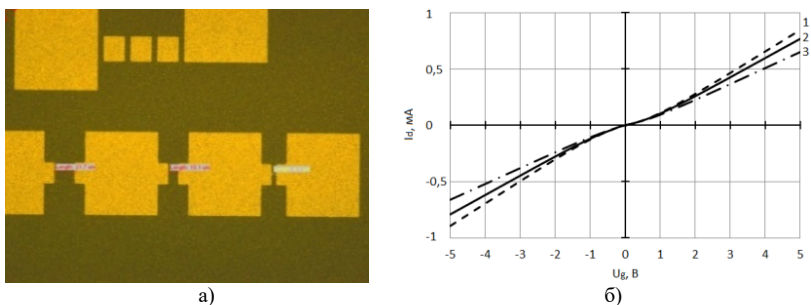


Рис. 1. а) Изображение топологии контактов (светлые области) на поверхности пленки SiC;
 б) Вольт-амперные характеристики контакта 3C-SiC/TiN.
 Длина канала: 1) 5 мкм; 2) 10 мкм; 3) 20 мкм

На основе выращенных слоев 3C-SiC удалось получить структуры TiN/3C-SiC с типичными омическими вольт-амперными характеристиками. Проведена оценка концентрации примеси в слое 3C-SiC $N = 1.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Работа проведена с применением оборудования центра коллективного пользования «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников» Национального исследовательского ядерного университета МИФИ.

Литература

1. Y. Suzuki et al., Materials Science Forum, **556-557**, 705-708 (2007).
2. J. Eriksson et al., Materials Science Forum, **615-617**, 569-572 (2009).

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА КАДМИЯ
И ОКСИДА ТИТАНА**

В.С. Федосенко, М.М. Иджи, А.А. Лозовенко, *Г.Г. Горох

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

**INVESTIGATION OF NANOCOMPOSITES BASED ON CADMIUM SULFIDE
AND TITANIUM OXIDE**

V. Fedosenko, M. Iji, A. Lozovenko, *G. Gorokh

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

Nanosystems consisting of titanium oxide and cadmium sulfide have been formed, their structural-morphological and current-voltage characteristics have been studied, and the photoluminescent properties of the TiO_2/CdS structure have been determined.

В современных изделий микро-, опто- и нанoeлектроники широко используются пленки сульфидов металлов [1, 2]. Целью работы является разработка и комплексное исследование фотовольтаических и фоточувствительных матричных покрытий на основе островково-сетчатых (Ti/TiO_2) наносистем, модифицированных сульфидом кадмия.

Двухслойную тонкопленочную систему Ti/Al ($\text{Ti} - 200 \text{ нм}$, $\text{Al} - 1 \text{ мкм}$) анодировали в $0.4 \text{ М H}_3\text{PO}_4$ при постоянной плотности тока $j_a = 6 \text{ мА/см}^2$ в комбинированном режиме: вначале формировали слой пористого анодного оксида алюминия (АОА), затем продолжали анодирование в потенциостатическом режиме при напряжении стационарного роста АОА, равном 120 В . Процесс анодирования прекращали после снижения величины анодного тока до 60 мкА/см^2 . После анодирования сформированный АОА стравливали в 50% растворе ортофосфорной кислоты при 50°C .

Соединение CdS получали путем смешивания двух промежуточных растворов. Сначала в 1 г CdSO_4 добавляли 2 г аммиака и перемешивали до получения однородной массы. Затем 2 г тиомочевины растворяли в 5 мл дистиллированной воды. Полученные составы соединяли в соотношении $1:2$ и помещали в водяную баню, перемешивая при температуре 30°C в течение $5\div 10$ минут до получения однородного состава. Затем полученный раствор наносили на разогретую подложку дозатором по 2 мл и центрифугировали при 1000 об/мин в течение 30 с . Образованную

пленку сушили в муфельной печи SNOL 3.2/1100 в атмосфере воздуха при 70 °С в течение 30 мин и 150 °С в течение 60 мин. На рис. 1 приведены микрофотографии и результаты EDX исследований сформированных структур.

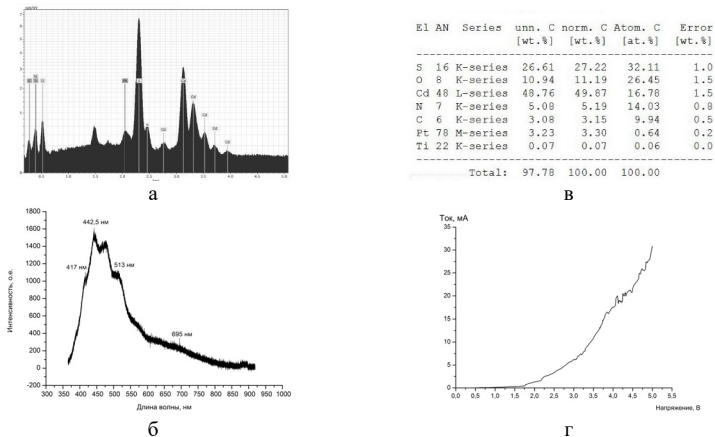


Рис. 1. Результаты исследований сформированных структур TiO_2/CdS : EDX-спектр (а), элементный состав (б), спектр фотолуминесценции (в), вольтамперная характеристика (г)

Пленка CdS представляет собой зернистое образование толщиной примерно 3 мкм с величиной зерен около 20 нм, общая толщина титана и его оксида составляет около 265 нм. Атомарное соотношение кадмия и серы в сформированной структуре TiO_2/CdS составило $\text{Cd} : \text{S} = 16.78 : 32.11$ ат.%. В спектре фотолуминесценции наблюдаются пики на 417, 442.5, 513 и 695 нм при длине волны возбуждения 365 нм. Анализируя полученные данные можно предположить, что коротковолновая люминесценция является люминесценцией наночастиц CdS, обусловленная различными типами дефектов, в то числе кислородными вакансиями, а длинноволновая люминесценция вызвана дефектами наноструктурированного оксида титана, расположенными в приповерхностной области кристаллитов. Двухкомпонентные наноструктурированные пленки весьма перспективны в качестве фотовольтаических и газочувствительных слоев [3,4].

Литература

1. S.P. Mondal, S.K. Ray, Physical Sciences, **82**(1), 21-29 (2012).
2. S.V. Rempel et al., Physics of the Solid State, **55**(3), 624-628 (2013).
3. G. Gorokh et al., pss (b) **257**(3), 1900283 (2020).
4. A. Zakhlebayaeva et al., Mat.Today: Proc. **37**(4), 4064 (2021).

**СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ GaInAsBi,
ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs**

****А.С. Пашченко¹, О.В. Девицкий¹, Л.С. Лунин¹***

¹Федеральный исследовательский центр

Южный научный центр Российской академии наук

Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, дом 41, e-mail: as.pashchenko@gmail.com

**STRUCTURAL PROPERTIES OF GaInAsBi SOLID SOLUTIONS
GROWN ON GaAs SUBSTRATES**

****A.S. Pashchenko¹, O.V. Devitsky¹, L.S. Lunin¹***

¹Federal Research Center Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences

Russia, 344006, Rostov-on-Don, Chekhov Avenue, 41, e-mail: as.pashchenko@gmail.com

GaInAsBi solid solutions on *n*-GaAs (100) substrates are synthesized. Their structural properties are studied by transmission electron microscopy and X-ray diffraction. It has been established that epitaxial films are elastically stressed. The lattice parameter of GaInAsBi is determined by X-ray diffraction to be 5.8476 Å. The mismatch between the GaInAsBi film and the GaAs substrate is 3.5%. It is shown that stacking faults oriented in the {111} direction are present in GaInAsBi films. The results of elemental analysis showed that the solid solution has the composition Ga_{0.75}In_{0.25}As_{0.97}Bi_{0.03}.

Актуальность создания висмутсодержащих твердых растворов обусловлена возможностью резко уменьшать ширину запрещенной зоны соединений III-V в пределах 55÷90 мэВ/% Bi [1] в силу эффекта антипересечения валентной зоны [2, 3]. Эта возможность дает перспективы инженерии запрещенной зоны твердых растворов для применения в инфракрасной оптоэлектронике. Поверхностно-активные свойства Bi [4] препятствуют его гомогенному включению в эпитаксиальный слой. Могут возникать явления фазового разделения в виде капель Ga-Bi на поверхности или модуляции состава Bi в объеме тонкой пленки [5]. Для изучения оптических и электрических свойств висмутсодержащих твердых растворов требуется улучшить структурные свойства тонких пленок.

Целью настоящей работы заключалась в синтезе твердого раствора GaInAsBi на подложке GaAs и изучении его структурных свойств.

Твердый раствор GaInAsBi выращивался методом импульсного лазерного напыления (ИЛН) на подложки *n*-GaAs(100). Остаточное давление в камере составляло 10⁻⁴ Па. Температура подложки составляла 350 °С, плотность энергии лазерного излучения $F = 2.3$ Дж/см², время напыления 60 мин. Изучение структурных свойств выполнялось с использованием

оборудования федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021) методом рентгеновской дифракции (XRD) и методом просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ). Определение химического состава твердых растворов и картирование по толщине пленки проводилось методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа EDS.

На рис. 1 приведены результаты просвечивающей микроскопии синтезированного твердого раствора GaInAsBi на подложке GaAs. Видно,

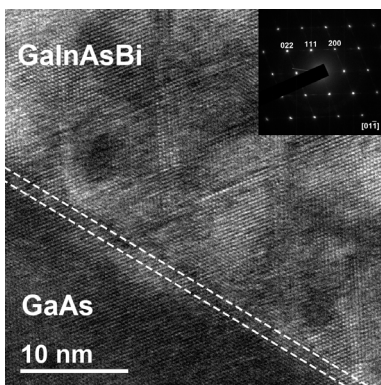


Рис. 1. ТЕМ-изображение гетерограницы GaInAsBi/GaAs (на вставке приведена картина электронной дифракции от плёнки)

что плёнка ориентирована плоскостями (100) параллельно аналогичным плоскостям подложки, что говорит о реализации эпитаксиального роста. Следует отметить, что в пленке присутствуют дефекты упаковки, ориентированные по плоскостям типа $\{111\}$. Таким образом выращенный слой GaInAsBi является упругонапряженным. Из других особенностей можно отметить низкую шероховатость интерфейса с подложкой ($1\div 2$ нм). Результаты XRD показали, что твердый раствор GaInAsBi имеет параметр ячейки равный $5.8476 \text{ \AA}$, при этом средний размер области когерентного рассеяния составил 20 нм. Результаты EDS показали, что твердый раствор имеет состав $\text{Ga}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{As}_{0.97}\text{Bi}_{0.03}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-79-10024).

Литература

1. L. Wang et al., Crystals, **7**(3), 1-63 (2017).
2. S. Francoeur et al., Appl. Phys. Lett., **82**, 3874 (2003).
3. K. Alberi et al., Phys. Rev. B, **75**, 045203 (2007).
4. J. Honolka et al., Phys. Rev. Mat., **3**, 044601 (2019).
5. D.L. Sales et al., Appl. Phys. Lett., **98**, 101902 (2011).

**ПРЯМОЙ И ОБРАТНЫЙ 2D↔3D ПЕРЕХОД ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaN НА ПОВЕРХНОСТИ AlN**

****Я.Е. Майдэбур¹, Т.В. Малин¹, К.С. Журавлев¹***

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Россия, 630090, г.Новосибирск, пр. Лаврентьева, дом 13, e-mail: hnxyr5@gmail.com

**FORWARD AND REVERSE 2D↔3D TRANSITION IN GaN QUANTUM DOTS
FORMATION ON AlN SURFACE**

****Y.E. Maidebura¹, T.V. Malin¹, K.S. Zhuravlev¹***

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Russia, 630090 Novosibirsk, Lavrentiev aven. 13, e-mail: hnxyr5@gmail.com

The transformation of a two-dimensional (2D) elastically strained GaN layer on the AlN surface into three-dimensional (3D) GaN islands (forward 2D-3D transition), as well as the transformation of 3D islands into an elastically strained 2D layer (reverse 3D-2D transition) with a change in the flow of ammonia on the surface of the GaN layer, was studied by the method of reflection high energy electron diffraction. It was found that when ammonia is periodically turned off/on, a 2D-3D/3D-2D transition occurs. In addition, a forward 2D-3D transition occurs not only with a complete turning off, but also with a decrease in ammonia flow. Based on the previously developed kinetic model, it is shown that the forward and reverse transitions are explained by the competition of the processes of adsorption and desorption of ammonia and the movement of ammonia elements to energetically favorable positions on the GaN surface.

Электронные и оптические свойства полупроводниковых квантовых точек (КТ) вызывают большой интерес исследователей за счет яркого проявления квантово-размерных эффектов, что важно при создании одно-электронных транзисторов, однофотонных излучателей и светоизлучающих диодов. Типичным способом формирования КТ при росте в молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) является рост по механизму Странского-Крастанова (С-К). В системе GaN/AlN наблюдается модифицированный механизм С-К, в котором для формирования 3D островков из 2D слоя GaN (2D-3D переход) необходимым условием является остановка роста и модификация поверхности слоя GaN, и в случае МЛЭ с аммиаком в качестве источника азота модификация заключается в отключении потока аммиака [1, 2]. Однако механизмы 2D-3D перехода до сих пор остаются не ясными.

Образцы выращивались на установке MBE "Riber CBE-32" с аммиаком в качестве источника азота. Переход 2D-3D был исследован in situ методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) с после-

дующим анализом поведения дифракционной картины с помощью системы kSA 400. Чтобы выяснить влияние испарения GaN, мы оценили толщину слоя GaN до и после манипуляций с поверхностью с помощью методов фотолюминесценции (ФЛ) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС). Для расчета поверхностной энергии 2D слоя GaN была использована разработанная ранее кинетическая модель [2]. Кинетическая модель позволяет оценить изменение элементного состава фрагментов аммиака на поверхности слоя GaN и поверхностную энергию последнего при изменении ростовых условий (поток аммиака и температура подложки). Помимо элементного состава, в модели учитывается процесс занятия частицами различных положений на поверхности слоя GaN.

В результате, была исследована трансформация псевдоморфного слоя GaN, выращенного методом аммиачной МЛЭ на поверхности AlN. Экспериментально показано, что выключение или уменьшение потока аммиака до определенных значений приводит к трансформации 2D слоя в 3D островки (прямой 2D-3D переход), а последующее включение потока аммиака приводит к перестройке поверхности из 3D в 2D состояние (обратный 3D-2D переход). Установлено минимальное значение эквивалентного давления пучка NH_3 при различных температурах для предотвращения преобразования 2D слоя GaN в 3D островки. Теоретически мы показали, что морфология поверхности слоя GaN сильно коррелирует с его поверхностной энергией. Поверхностной энергией можно управлять, изменяя состав и положение аммиачных фрагментов на поверхности GaN. Это дает возможность контролировать морфологию и плотность GaN КТ путем изменения поверхностной энергии GaN.

Литература

1. Damilano, J. Brault & J. Massies. J. of Appl. Phys., **118**, 024304 (2015).
2. Y.E. Maidebura et al., Appl. Surf. Sci., **577**, 151802 (2022).

МЕХАНИЗМЫ УДАЛЕНИЯ ОКСИДА С ПОВЕРХНОСТИ InP(001) В ПОТОКЕ As₄

**Д.В. Дмитриев, Д.А. Колосовский, А.И. Торопов, К.С. Журавлев*

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

MECHANISMS OF OXIDE REMOVAL FROM InP(001) SURFACE IN As₄ FLUX

**D.V. Dmitriev, D.A. Kolosovsky, A.I. Toropov, K.S. Zhuravlev*

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

The influence of the annealing temperature and arsenic flux on the process of removing the oxide layer from the epi-ready InP(001) surface was studied by reflection high-energy electron diffraction. It is shown that the removal of the oxide layer from the InP(001) surface occurs as a result of thermal decomposition and chemical interaction of oxides with arsenic.

InP является ключевым материалом радиофотоники, позволяющим создание в одном технологическом процессе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) для монолитных радиофотонных интегральных схем, содержащих излучающие, передающие, модулирующие и принимающие свет элементы [1]. Рост ГЭС начинается с получения атомарно-чистой поверхности InP подложки путем термической очистки [2]. Для предотвращения неконгруэнтного разложения InP, отжиг осуществляют в потоке мышьяка или фосфора. Отжиг в потоке мышьяка, позволяет получить резкую гетерограницу слой/подложка и избежать неконтролируемого встраивания фосфора в мышьяк-содержащие слои InAlAs/InGaAs, согласованные по параметру кристаллической решетки с подложкой InP(001). При взаимодействии мышьяка с окисленной поверхностью InP формируется твердый раствор InP_{1-x}As_x толщиной 2÷3 бислоя [3], состав которого зависит от температуры отжига и потока мышьяка [4]. На сегодняшний день механизмы удаления оксида, трансформации поверхности и формирования слоя InPAs до конца не изучены, однако, очевидно, что понимание этих процессов важно для технологии роста ГЭС на InP. В данной работе, методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО), in-situ изучены механизмы удаления оксида с поверхности epi-ready InP(001) подложки в потоке мышьяка в сверхвысоком вакууме.

Оксидный слой с поверхности InP подложки удалялся в ростовой камере установки молекулярно-лучевой эпитаксии Riber Compact-21T прогревом в потоке мышьяка до появления сверхструктуры (4×2). Процесс

удаления оксида регистрировался с помощью системы ДБЭО kSA 400 фирмы k-Space Associates.

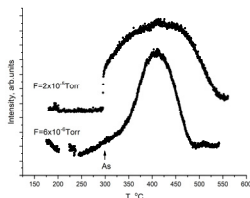


Рис. 1. Изменение интенсивности (00) рефлексов ДБЭО картины при отжиге InP в потоке мышьяка

Мы наблюдали медленное возрастание интенсивности (00) рефлекса при $T > 250$ °C без потока мышьяка, что говорит о термическом удалении оксида. В момент подачи потока мышьяка $F_{As} = 6 \cdot 10^{-6}$ Торр при $T = 300$ °C не происходит изменений в зависимости интенсивности (00) рефлекса, т.е. вклад взаимодействия с мышьяком в утонение оксида незначителен. При $T \sim 350$ °C

характер процесса удаления оксида резко изменяется, что связано с активацией химической реакции взаимодействия мышьяка с оксидом. Действительно, согласно закону Вант-Гоффа, повышение температуры на 10 градусов приводит к увеличению скорости реакции в 2÷4 раза. При большом потоке мышьяка $F_{As} = 2 \cdot 10^{-5}$ Торр происходит резкое утонение слоя оксида. Это связано с повышенным вкладом химических реакций мышьяка и оксида, который пропорционален концентрации мышьяка. Однако, в результате этих реакций, оксид не удаляется полностью и при дальнейшем нагреве происходит медленное термическое утонение оксида. При температуре $T \sim 410$ °C достигается максимум интенсивности (00) рефлекса, что свидетельствует о полном удалении оксидного слоя, который более не рассеивает электронный пучок [5]. Последующее понижение интенсивности (00) рефлекса связано с увеличением шероховатости поверхности, вследствие десорбции фосфора и сегрегации индия, но при большом потоке мышьяка оно происходит медленнее, поскольку поток мышьяка понижает десорбцию элементов V-группы с поверхности.

Таким образом, вероятно, оксидный слой состоит из оксидов двух типов, один из которых активно взаимодействует с мышьяком, а второй разлагается преимущественно термически.

Литература

1. M. Smit, K. Williams, Jos van der Tol, APL Photonics, **4**, 050901 (2019).
2. K.S. Zhuravlev, A. L. Chizh, et al., J. Semicond, **43**, 012302 (2022).
3. D.V. Dmitriev, D.A. Kolosovsky, et al., Surface Science, **710**, 121861 (2021).
4. Д.В. Дмитриев, Д.А. Колосовский и др., ФТП, **55**(10), 877 (2021).
5. Д.В. Дмитриев, Д.А. Колосовский и др., Автометрия, **57**(5) (2021).

**РОСТ ОСТРОВКОВ InAs НА ПОВЕРХНОСТИ InP(001)
ПРИ ОТЖИГЕ В ПОТОКЕ МЫШЬЯКА**

**Д.А. Колосовский, Д.В. Дмитриев, С.А. Пономарев, А.И. Торопов, К.С. Журавлев*

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

**FORMATION OF BINARY InAs ON THE InP(001) SURFACE DURING ANNEALING IN
AN ARSENIC FLUX**

**D.A. Kolosovsky, D.V. Dmitriev, S.A. Ponomarev, A.I. Toropov, K.S. Zhuravlev*

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

The InAs areas formation on the surface of InP (001) substrates annealed in an arsenic flux in an ultra-high vacuum was determined by atomic force microscopy. It is shown that the InAs areas are distributed non-uniformly over the surface and have an elongated shape predominantly along the [1 1 0] direction. The height and density of InAs areas increases with an increase in the annealing temperature from $4.4 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ at 480 °C to $1.8 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ at 540 °C. The total surface area occupied by InAs islands does not exceed 1.5 % of the substrate area.

Подложки InP(001) используют для создания гетероэпитаксиальных структур (ГЭС), на основе которых изготавливают транзисторы с высокой подвижностью электронов, лазеры, электрооптические модуляторы и фотодиоды [1, 2]. Рост ГЭС начинается с удаления аморфного окисного слоя подложки. Обычно окисный слой на подложке InP удаляют высокотемпературным отжигом в потоке As [3]. Однако в процессе отжига происходит изменение элементного состава поверхности подложки с образованием твердого раствора InPAs и островков InAs [4–6]. Решеточное рассогласование между InP и InAs приводит к возникновению механических напряжений дефектов в ГЭС, что влечет изменения в начальных этапах зародышеобразования и последующих процессах эпитаксиального роста. Поэтому целью работы является исследование процесса формирования InAs островков на поверхности InP(001) в процессе высокотемпературного отжига в потоке мышьяка.

В работе использовались *epi-ready* подложки InP(001) фирмы АХТ. Отжиг проводился в ростовой камере установки молекулярно-лучевой эпитаксии Riber Compact 21T. Температура отжига варьировалась в пределах 480÷540 °C, а поток мышьяка от $8 \cdot 10^{-6}$ Торр до $2.5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Отжиг завершался при формировании структуры (4×2) на дифракционной кар-

тине, что свидетельствует об атомарно чистой поверхности подложки [7]. Морфология поверхности была изучена методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Bruker Multimode 8.

В работе наблюдается экспоненциальный рост плотности InAs островков от $4.4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ до $1.8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ при повышении температуры отжига и потока мышьяка. Островки вытянуты вдоль направления $[1 \ 1 \ 0]$ и имеют латеральный размер от 65 до 130 нм вдоль этого направления. Латеральный размер InAs островков вдоль направления $[1 \ 1 \ 0]$ составляет от 40 до 90 нм. Суммарная площадь поверхности, занимаемая InAs островками, не превышает 1.5% от площади подложки. Повышение температуры отжига приводит к более равномерному распределению InAs островков по поверхности. Наименьшая плотность островков и занимаемая ими площадь наблюдались при температуре отжига 480 °С и потоке мышьяка $8 \cdot 10^{-6} \text{ Торр}$.

Причиной появления этих островков является десорбция фосфора и сегрегация индия т.к. температура отжига подложки выше температуры диссоциации поверхности InP. В результате на поверхности образуются избыточная концентрация адатомов индия, которые мигрируют по поверхности. В изломе моноатомной ступени наименьшая энергия связи и встраивание в излом адатомов, находящихся на расстоянии длины диффузии от излома моноатомной ступени, наиболее вероятно. В излом моноатомной ступени встраиваются адатомы индия и мышьяка, в потоке которого происходит процесс отжига. В результате образуется InAs зародыш, который разрастается.

В работе показано формирование островков InAs на поверхности подложки InP(001), отожженных в потоке мышьяка. Плотность и размер островков увеличиваются с повышением температуры отжига. Островки InAs расположены неоднородно по поверхности, имеют вытянутую форму в направлении $[1 \ \bar{1} \ 0]$. Предложен механизм формирования островков InAs согласующийся с экспериментальными данными.

Литература

1. S. Lee, M. Winslow, et al., Sci. Rep., **10**, 16735 (2020).
2. K. S. Zhuravlev, A. L. Chizh, et al., J. Sem., **43**, 012302 (2022).
3. Д. В. Дмитриев, Д. А. Колосовский и др., Автометрия, **57**(5), 1 (2021).
4. D. V. Dmitriev, D. A. Kolosovsky, et al., Surf. Sci., **710**, 121861 (2021).
5. D. Kolosovsky, D. Dmitriev, et al., IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), **17** (2021).
6. Д. В. Дмитриев, Д. А. Колосовский и др., ФТП, **55**(10), 877 (2021).
7. S. Katsura, Y. Sugiyama, et al., Appl. Phys. Lett., **62**, 1910 (1993).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И АСИММЕТРИИ ФОРМЫ
НАНОКРИСТАЛЛОВ CdS ИЗ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ
РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ**

****К.А. Свит, А.А. Зарубанов, К.С. Журавлев***

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Россия, 63090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, дом 13, e-mail: svit@nanotech.nsk.ru

**DETERMINATION OF THE CdS CRYSTAL STRUCTURE AND SHAPE ASYMMETRY
USING EXTENDED X-RAY ABSORPTION FINE STRUCTURE SPECTROSCOPY**

****K.A. Svit, A.A. Zarubanov, K.S. Zhuravlev***

A. V. Rzhzanov institute of semiconductor physics
Russia, 630090 Novosibirsk, pr. ak. Lavrentieva 13, e-mail: svit@nanotech.nsk.ru

For cadmium sulfide nanocrystals synthesized by the Langmuir-Blodgett method, the possibility of using EXAFS spectroscopy to determine the nanocrystals crystal structure and shape asymmetry was demonstrated. The proposed technique was based on a comparison of the coordination number obtained from the EXAFS spectra measured at different X-ray beam orientation relative to the sample surface. Information about the crystal structure was determined from the interatomic distance between Cd and S atoms. Obtained result showed that CdS nanocrystals within the matrix have cubic crystal structure and its shape is oblate spheroid. At the same time, after the matrix evaporation at 200 °C nanocrystals have spherical shape and hexagonal crystal structure.

Полупроводниковые нанокристаллы (НК) являются интересным материалом с точки зрения исследования в них различных физических явлений, а также уже несколько лет используются на практике в качестве люминофоров в дисплеях. В связи с этим, важной является задача характеристики НК, в частности контроля размера, формы и кристаллической структуры. Для решения этих задач разработано множество методов микроскопии, а также рентгеновского дифракционного анализа. Однако их использование для НК синтезированных в органических анизотропных пленках ограничено. В частности, до сих пор остается дискуссионным вопрос о форме НК CdS, синтезированных с помощью метода Ленгмюра-Блоджетт [1]. Слабо изучена кристаллическая структура данных НК и анизотропия их формы. Для разрешения поставленных задач в данной работе предложен метод, основанный на анализе тонкой структуры поглощения рентгеновских лучей (ТССПРЛ).

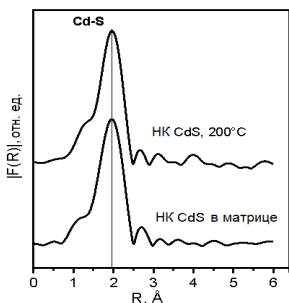


Рис. 1. Спектры ТССПРЛ (Фурье-преобразование) для образцов с НК CdS В матрице и после ее удаления

На рис. 1 представлены данные Фурье-преобразование спектров ТССПРЛ, полученное из результатов измерения осцилляций поглощения вблизи К-линии Cd. Результаты аппроксимационного анализа полученных данных показаны в Таблице 1, где приведены значения координационных чисел и межатомных расстояний Cd-S при различной ориентации рентгеновского пучка относительно поверхности образца с НК.

Таблица 1

Данные аппроксимации спектров ТССПРЛ

Образец	Параллельная ориентация пучка		Перпендикулярная ориентация пучка	
	$N_{Cd-S} \pm 0.2$	$R_{Cd-S} \pm 0.005$	$N_{Cd-S} \pm 0.2$	$R_{Cd-S} \pm 0.005$
В матрице	3.9	2.508	3.4	2.497
200 °C	3.8	2.523	3.9	2.53

Как видно из результатов, межатомное расстояние для НК в матрице соответствует кубической структуре CdS ($2.515 \text{ \AA}$), в то время как у НК после отжига при 200°C межатомное расстояние соответствует гексагональной структуре ($2.525 \text{ \AA}$). Координационные числа при различной ориентации пучка рентгеновских фотонов отличны для НК в матрице и совпадают для НК после отжига. Это свидетельствует о симметрии НК после отжига и их асимметрии в матрице. Причем, так как значение координационного числа меньше при перпендикулярной ориентации пучка, НК имеют форму эллипсоида, сплюснутого в направлении перпендикулярном плоскости подложки.

В работе, на примере НК CdS, синтезированных с помощью метода Ленгмюра-Блоджетт в матрице бегеновой кислоты, показана возможность исследования методом ТССПРЛ формы и кристаллической структуры НК. Опробованная методика может быть использована и для НК из других материалов, а также для других методик синтеза.

Литература

1. D.Yu. Protasov et al., J. Phys. Chem. C, **115**, 20148 (2011).

**НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЦЕССОВ ПОЛИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ПОДЛОЖЕК СОЕДИНЕНИЯ КАДМИЙ-ЦИНК-ТЕЛЛУР ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ
ГЕТЕРОСТРУКТУР КАДМИЙ-РТУТЬ-ТЕЛЛУР
МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

*А.А. Трофимов, *А.А. Новикова, М.О. Можаяева, К.А. Гладышева,
А.Е. Гончаров, А.М. Косякова*

АО «НПО «Орион»

Россия, 111538, г. Москва, Косинская улица, дом 9, e-mail: nastya.bagrova.95@mail.ru

**INITIAL STAGES OF POLISHING PROCESSES IN THE PRODUCTION
OF CADMIUM-ZINC-TELLURIUM COMPOUND SUBSTRATES FOR GROWING
CADMIUM-MERCURY-TELLURIUM HETEROSTRUCTURES
BY MOLECULAR BEAM EPITAXY**

*A.A. Trofimov, *A.A. Novikova, M.O. Mojaeva, K.A. Gladysheva,
A.E. Goncharov, A.M. Kosyakova*

Orion R&P Association, JSC

Russia, 111538, Moscow, Kosinskaya ulitsa 9, e-mail: nastya.bagrova.95@mail.ru

The solid solution of cadmium-mercury-tellurium is one of the main materials of IR photoelectronics in the world along with indium antimonide. The method of molecular beam epitaxy has a number of advantages over other methods for obtaining a cadmium-mercury-tellurium compound. At the same time, it is quite demanding on the preparation of substrates intended for growth processes. This work is devoted to the development of such stages of substrate preparation as grinding and polishing.

Первичная отработка процессов полирования в освоении производства подложек соединения кадмий-цинк-теллур (КЦТ) проводилась на пластинах КЦТ диаметром 50.8 мм, ориентированных в направлениях (111) и (211), а также на фрагментах таких пластин. В целом структурные свойства подложек КЦТ, используемые в данной работе, соответствовали таковым в работе [1]. Образцы подвергались одностороннему шлифованию свободным абразивом с использованием абразивной суспензии на основе мелкодисперсного Al_2O_3 .

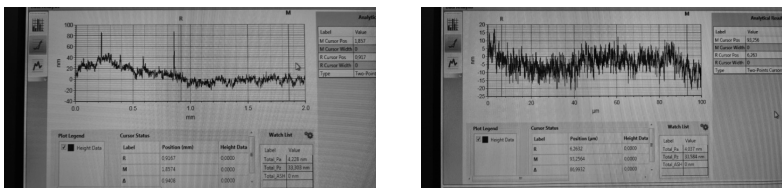


Рис. 1. Оценка шероховатости поверхности на длине 1 мм (слева) и 100 мкм (справа)

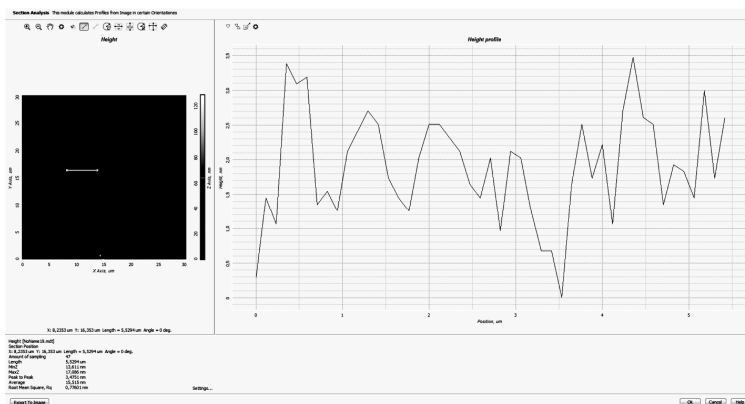


Рис. 2. Шероховатость поверхности фрагмента КЦТ ориентации (111) на длине 5.5 мкм. Разница по пикам составила 3.4 нм

После шлифования проводились процессы полирования образцов различными типами суспензий. Оценка на DektakXT шероховатости поверхности R_a фрагмента КЦТ после полирования суспензией Chemlox Logitech на длине 1 мм составила 4.2 нм, на длине 100 мкм – 4.0 нм (рис. 1). Исследования шероховатости поверхности на атомно-силовом микроскопе показаны на рис. 2. Обработаны пластины КЦТ – две тестовые ориентации (111) и одна опытная ориентации (211) (рис. 3).

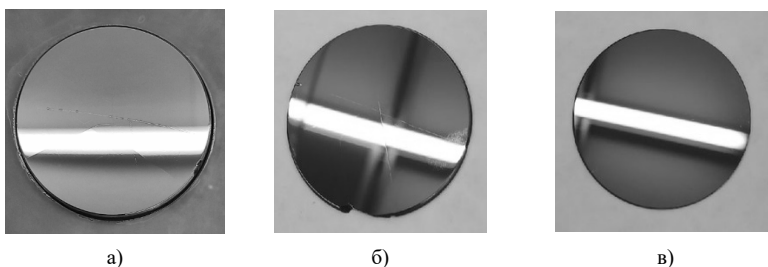


Рис. 3. Пластины КЦТ диаметром 50.8 мм ориентации (111) (а, б) и опытная пластина КЦТ (211) кристаллографической ориентации (211) (в) после полирования

Литература

1. Е.В. Пряникова и др., Прикладная физика, **2**, 82-87 (2016).
2. С.Н. Филиппов, К.О. Болтарь, Труды МФТИ, **2**, 1(5), 52-66 (2010).
3. Н.А. Кульчицкий, А.А. Мельников, Нано- и микросистемная техника, **6**, 9-16 (2011).

ГИПЕРЗВУКОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ЗАГЛУБЛЁННЫХ ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ СЛОЁВ В АЛМАЗЕ

**Н.Ю. Фролов¹, А.Ю. Клоков², А.И. Шарков², Р.А. Хмельницкий²*

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет Московский Инженерно-Физический Институт

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31 e-mail: frolil199999@gmail.com

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53

HYPERSONIC MICROSCOPY OF BURIED GRAPHITIZED LAYERS IN DIAMOND

**N.Yu. Frolov¹, A.Yu. Klovov², A.I. Sharkov², R.A. Khmelitsky²*

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Russia
115409, Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: frolil199999@gmail.com

²P.N. Lebedev Physical Institute RAS

Russia, 119991, Moscow, Leninskii pr. 53

We employ here a picosecond ultrasonic technique to study buried graphitized layers in diamond matrix. Temporal variation of the reflection coefficient of Al film that covers diamond wafer after the femtosecond laser pulse excitation was measured using an interferometric technique with spatial resolution. Mapping of the Fourier spectra of the response clearly visualizes different composition regions and can therefore serve as an acoustic microscopy tool with micrometer resolution.

Ряд уникальных свойств алмаза (в частности, его высокие теплопроводность и скорость звука) делают его перспективным материалом для создания нового поколения микро- и нано- электромеханических систем, электронных устройств, а также акустоэлектронных устройств гигагерцового диапазона. Одним из возможных элементов этих устройств являются графитизированные слои, получаемые в результате отжига аморфизованных в ходе ионной имплантации слоёв [1]. Глубина залегания таких слоёв, в зависимости от имплантируемого иона и его энергии, могут достигать нескольких микрон, а толщина – от десятков до сотен нанометров. Работа посвящена исследованию акустических и структурных свойств (глубина залегания и толщина) таких слоёв методом гиперзвуковой микроскопии, основанной на фемтосекундном оптическом возбуждении и оптической регистрацией распространения упругих импульсов в образце [2].

Объект исследования, представленного в данной работе – пластина алмаза с встроенными графитизированными слоями, покрытая термически напылённой алюминиевой плёнкой и метод исследования на основе мето-

дики оптического возбуждения и зондирования были аналогичны описанным в [3]. Подгонка экспериментальных откликов рассчитанными по модели, описанной в [4], позволяет оценивать такие акустические параметры структур, как скорость звука, толщина и глубина залегания встроенных слоёв.

Регистрируемые отклики являются результатом наложения быстропеременной (с периодом в десятки пикосекунд) составляющей, вызванной приходом упругих волн на фоне медленно меняющегося фона, вызванного разогревом (со временем спада в сотни пикосекунд). Спектр быстропеременной части откликов показывает наличие выраженных пиков, специфичных для каждой области имплантации.

Картографирование спектров вдоль линии либо по пространству позволяет отчётливо выявлять области различного строения, реализуя, таким образом, гиперзвуковую микроскопию структур. На рис. 1 показано картографирование области с дозой $10 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Эта доза была достигнута в результате нескольких последовательных процессов облучения. Из-за смещения маски, граница области представляет собой ступенчатую структуру, что и выявляется на спектрах откликов, регистрируемых в ходе эксперимента.

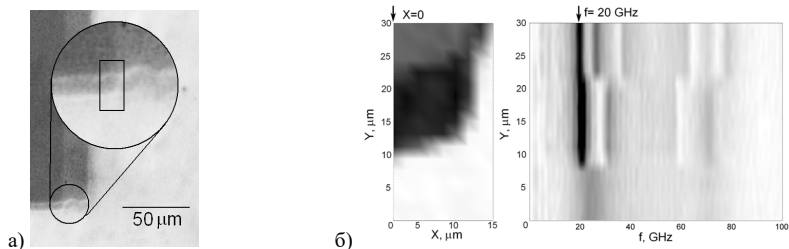


Рис. 1. а) Фотография исследуемой части структуры до нанесения алюминиевой плёнки. Цвета определяются глубиной залегания слоёв. б) Слева: 2D-карта области, выделенной рамкой на Рис. 1а на частоте 20 ГГц. Справа: развёртка спектров вдоль линии $X = 0$

Авторы благодарны В.А. Дравину за проведение ионной имплантации алмазных пластин. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-598 в ФИАН.

Литература

1. A.A. Gippius, R.A. Khmel'nitsky et al., *Diamond and Related Materials*, **8**, 1631-1634 (1999).
2. A.Yu. Klovov et al., *Nano Lett.*, **22**, 2070-2076 (2022).
3. А.И. Шарков, А.Ю. Клоков, Р.А. Хмельницкий, 12-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», Сборник трудов М.: НИЯУ МИФИ, 121–122 (2021).
4. A.Yu. Klovov et al., *Journal of Applied Physics*, **127**, 154304 (2020).

ОДМР КОМПЛЕКСА NV – ^{13}C В ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОМ АЛМАЗНОМ СЛОЕ

****А.Т. Салказанов¹, Д.М. Арзамасцева¹, С.А. Тарелкин^{1,2}, М.О. Смирнова¹,
А.С. Гусев¹, Н.И. Каргин¹***

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

²Государственный Научный Центр Российской Федерации
«Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов»,
108840, г. Москва, г. Троицк, улица Центральная, дом 7а.

ODMR OF THE NV – ^{13}C COMPLEX IN A HOMOEPITAXIAL DIAMOND LAYER

****A.T. Salkazanov¹, D.M. Arzamastseva¹, S.A. Tarekin^{1,2}, M.O. Smirnova¹,
A.S. Gusev¹, N.I. Kargin¹***

¹National Research Nuclear University MEPHI,
115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: alik.salkazanov@inbox.ru

²Federal State Budgetary Institution
“Technological institute for superhard and novel carbon materials”,
108840, Moscow, Troitsk, Centralnaya street, 7a.

This work is devoted to mastering the technique of measuring the NV – ^{13}C optically detectable magnetic resonance (ODMR) spectra and selecting a suitable measurement mode. The studies were carried out using two diamond samples that contain layers with a modified isotopic composition.

Комплекс NV – ^{13}C , состоящий из отрицательно заряженного азотно-вакансионного (NV) центра и расположенного на расстоянии нескольких ангстрем от изотопного атома ^{13}C , имеет большие перспективы для применения в квантовых устройствах обработки информации. Например, в качестве квантовой памяти может быть использован спин ядра изотопа углерода ^{13}C имеющего сверхтонкую связь с NV – центром [1].

Для практической реализации разрабатываемых квантовых технологий на основе комплексов NV – ^{13}C необходимо иметь полную информацию об их спиновых свойствах и характеристиках сверхтонких взаимодействий в таких системах, а также их взаимосвязях с оптическими характеристиками. В экспериментах с одиночными спиновыми системами для этой цели обычно используются метод оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Методом ОДМР регистрируются спектры магнитного резонанса и сохраняются высокое разрешение и информативность ЭПР [2].

Данная работа посвящена освоению методов измерения ОДМР спектров комплексов NV – ^{13}C в обогащенных изотопами углерода ^{13}C алмаз-

ных образцах. Проведенные исследования не выявили одиночных комплексов NV – ^{13}C , поэтому измерения проводились для ансамбля NV – центров в изотопно – модифицированных алмазных слоях. Целью настоящей работы является определение оптимальных значений мощности лазера накачки и СВЧ излучения, а также длительности СВЧ-импульса.

Для измерения ОДМР использовался конфокальный микроскоп Confotec NR 500. Лазерный луч с длиной волны 532 нм фокусировался на образец через объектив микроскопа с числовой апертурой 1.4. Флуоресцентный сигнал направлялся на детектор одиночных фотонов с помощью оптоволоконна. Микроволновое поле создавалось с помощью антенны (диапазон частот $\sim 2.82 \div 2.9$ ГГц), на поверхности которой размещались алмазные образцы.

Исследуемые образцы представляют собой подложку монокристаллического алмаза, полученную методом высоких давлений и температур (НРНТ), с эпитаксиальным алмазным слоем выращенным методом осаждения из газовой фазы. В процессе CVD-роста создается подповерхностный слой с измененным изотопным составом и NV-центрами. Образец 1 содержит 30% изотопов ^{13}C в изотопно-модифицированном слое, а образец 2 содержит 99.9 % ^{13}C . Так же для сравнения измерялся спектр ОДМР для образца с естественным изотопным составом.

В результате для образца 1 с 30% содержанием ^{13}C был получен спектр, по характеру аналогичный спектру из работы [3], где исследовался образец с 10% содержанием ^{13}C . Измерение проводилось при мощности лазера накачки ~ 1 мВт, мощности СВЧ излучения 7 Вт и длительности импульса 15 нс. Согласно данным работы [3] для измерения спектра ОДМР для образца с 99.9 % ^{13}C нужна более широкополосная антенна ($2600 \div 3200$ ГГц).

Литература

1. A.P. Nizovtsev et al., Optics and Spectroscopy, **2**(108), 230–238 (2010).
2. A.P. Nizovtsev et al., New Journal of Physics, **16** (2014).
3. A. Jarmola et al., Physical Review B., **9**(94), 094108 (2016).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ NV ЦЕНТРОВ
НА РАЗЛИЧНЫХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ПЛОСКОСТЯХ АЛМАЗА**

****Д.М. Арзамасцева¹, А.С. Гусев¹, Н.И. Каргин¹, А.Т. Салказанов¹, М.О. Смирнова¹,
С.А. Тарелкин^{1,2,3}***

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

²Государственный Научный Центр Российской Федерации
«Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов»,
108840, г. Москва, г. Троицк, улица Центральная, дом 7а

³Всероссийский Научно-Исследовательский Институт оптико-физических измерений,
119361, г. Москва, улица Озерная, дом 46

**INVESTIGATION OF THE FORMATION OF NV CENTERS
ON VARIOUS CRYSTALLOGRAPHIC PLANES OF DIAMOND**

****D.M. Arzamastseva¹, A.S. Gusev¹, N.I. Kargin¹, A.T. Salkazanov¹, M.O. Smirnova¹,
S.A. Tarelkin^{1,2,3}***

¹National Research Nuclear University MPEPhI, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31,
e-mail: DMArzamastseva@mephi.ru

²Federal State Budgetary Institution "Technological institute for superhard and novel carbon materials", 108840, Moscow, Troitsk, Centralnaya street, 7a

³The All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements
Federal State Unitary Enterprise (VNIIOFI), 119361, Moscow, Ozernaya street, 46

Nitrogen-vacancy centers in artificial diamond have attracted the attention of many research groups over the past decade due to their unique spin properties and the possibility of being used at room temperature. The use of NV centers is expected to lead to rapid progress in many of the intended applications, especially in quantum informatics and nanoscale magnetometers. Therefore, great attention is paid to the technology of growing wafers and the methods of creating the NV centers. In this work, it was found that, during homoepitaxial growth of diamonds, NV centers are preferentially formed on faces with an orientation different from that of the (111) substrate.

Одними из наиболее перспективных приборов на сегодняшний день являются магнитометры на основе ансамблей центров окраски азот-вакансия (NV) в алмазе, которые позволяют достичь высокой чувствительности даже при работе в нормальных условиях [1]. Отсюда возникает необходимость в понимании наиболее предпочтительной грани роста для формирования NV.

Кристаллы искусственного алмаза высокого качества получают методом температурного градиента при высоком давлении и температуре [2]. Движущей силой кристаллизации является перепад концентраций

растворенного в металле углерода, обусловленный разностью температур в реакционном объеме. Выращенным кристаллам присуще секториальное строение. Ростовые сектора – это области, сформировавшиеся за счет захвата углерода через конкретную ростовую грань. Они различаются кристаллическим совершенством и примесным составом (рис. 1).

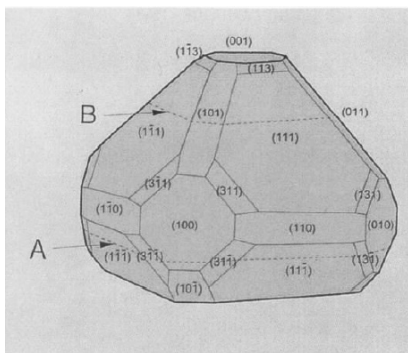


Рис. 1. Расположение граней и ростовых секторов алмазного кристалла с кубооктаэдрическим габитусом

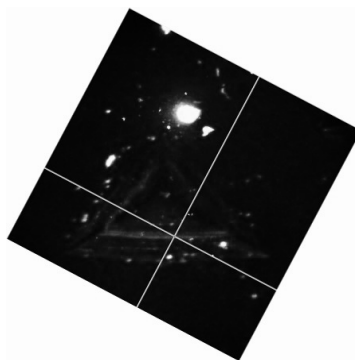


Рис. 2. Изображение участка поверхности, полученного с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ)

Далее на кристалле выращивается CVD пленка, в которой формируются NV-центры, но эпитаксиальный материал будет наследовать протяженные структурные дефекты подложки и в результате можно увидеть дефекты такие как, например, пирамидки на экспериментальном образце (рис. 2).

С использованием методики [3] были проведены расчёты, в результате которых получено, что на грани 1 количество NV $1.2 \cdot 10^7$, на 2 грани – $6 \cdot 10^7$ и на грани 3 (грань подложки) – $9 \cdot 10^7$. Откуда можно сделать вывод, что семейство граней 1 отличается от семейства граней 2 и 3 по коэффициенту встраивания азота или эффективности образования NV центров.

Литература

1. V. Acosta, P. Hemmer, MRS Bulletin, **2**(38), 127–130 (2013).
2. H. Sumiya, N. Toda, S. Satoh, J. of Cryst. Gr., 237–239, 1281–1285 (2002).
3. S.T. Alsid et al., Phys. Rev. Appl., **4**(12), 044003 (2019).

**ПЛЕНКИ n-InAs, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ
ЭПИТАКСИИ НА САПФИРЕ**

***А.А. Самолыга, А.Н. Ключков, А.Н. Виниченко, Д.А. Сафонов, С.М. Рындя,
А.А. Тимофеев, И.С. Васильевский***

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: alexs.3838@gmail.com

**n-InAs FILMS ON SAPPHIRE SUBSTRATES OBTAINED BY MOLECULAR-BEAM
EPITAXY**

***A.A. Samolyga, A.N. Klochkov, A.N. Vinichenko, D.A. Safonov, S.M. Ryndya,
A.A. Timofeev, I.S. Vasil'evskii***

National Research Nuclear University MEPhI
Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, 115409, e-mail: alexs.3838@gmail.com

In this work, InAs films obtained by molecular beam epitaxy on sapphire substrates were investigated. It was found that the use of InAlAs seed layer at the initial stage of growth leads to a decrease in the surface roughness and a decrease in the width of the x-ray rocking curves.

Для работы в условиях интенсивного ионизирующего излучения требуются полупроводниковые структуры на основе проводящей пленки, устойчивой к излучению непроводящей подложке. В данной работе исследуются легированные пленки InAs, выращенные на подложках из сапфира методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Задача эпитаксиального получения пленок InAs на сапфире является новой и практически неизученной [1]. Сложность заключается в различной кристаллической структуре и значительно различающихся периодах кристаллических решеток подложки Al_2O_3 и слоя InAs.

Пленки InAs с номинальной толщиной 100 нм были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber Compact 21-T. Температура роста составляла $430 \div 460^\circ\text{C}$. В образце #1 использовался зародышевый слой InAs, в образцах #2 и #3 – зародышевые слои InAlAs (2 нм) + InAs (2 нм).

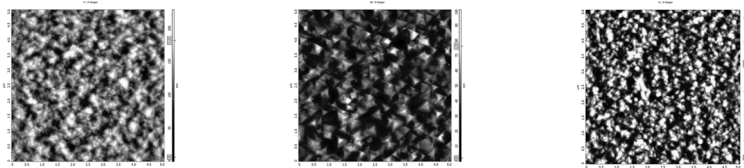


Рис. 1. Морфология поверхности пленок InAs #1, #2 и #3, полученная методом атомно-силовой микроскопии

Поверхность образца #1 (см. рис. 1) является холмистой, а у образцов #2 и #3 состоит из треугольных зерен с кристаллографически ориентированными гранями. Наличие треугольных наноструктур, повернутых друг относительно друга на 60° , может свидетельствовать о наличии эффекта двойникования. Шероховатость образцов #2 и #3 существенно ниже, чем у образца #1.

Были проведены измерения кривых дифракционного отражения в режиме $2\theta-\omega$ и проведена работа по идентификации плоскостей при помощи теоретических значений межплоскостных расстояний [2]. Показано, что преимущественная ориентация пленок InAs равна (111). Также были получены кривые качания для отражения InAs (111), на которых было показано (при анализе полуширины пиков), что структурное качество тех пленок, при росте которых был использован затравочный буферный слой, выше, чем пленок, выращенных напрямую на подложке [3]. Был сделан вывод о том, что введение буферного слоя положительно влияет на качество конечной структуры.

Для всех образцов были измерены полюсные фигуры (рис. 2) для отражений плоскостей InAs (111), (220) и (400). Анализ фигур показал поликристаллический характер пленок InAs, состоящих из двух семейств зерен с ориентацией поверхности (111), отличающихся поворотом кристаллической решетки на 60 градусов. Разная интенсивность отражений говорит о разном количестве или размере зерен двух семейств.

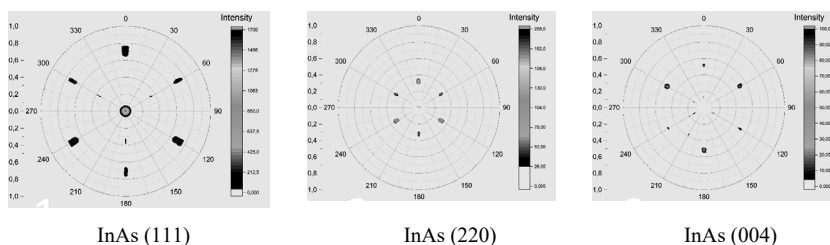


Рис. 2. Полюсные фигуры для образца #1

Литература

1. A. Agrawal, Y. Tchoe, Thin Solid Films.,709, 138204 (2020).
2. D.K. Bowen and B.K. Tanner, High Resolution X-Ray Diffractometry and Topography, 264p. (2019).
3. Р.Н. Кютт, Актуальные вопросы современного естествознания, 5, 43-57 (2007).

**СТАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ
И ТЕРАГЕРЦОВЫХ РТД СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaAs/AlAs**

*А.А. Алексанян¹, *А.Л. Карузский¹, Ю.А. Митягин¹, А.В. Пересторонин¹, А.П. Черняев²*

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

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

**STATIC EFFECTS IN THE ELECTRODYNAMICS OF SUPERCONDUCTORS
AND OF GaAs/AlAs TERAHERTZ RESONANT TUNNELING STRUCTURES**

*A.A. Aleksanyan¹, *A.L. Karuzskii¹, Yu.A. Mityagin¹, A.V. Perestoronin¹, A.P. Chernyaev²*

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

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

The study of electrodynamics of the surface impedance of superconductors and of the GaAs/AlAs terahertz resonant tunneling diodes demonstrates the similarity in the possible description of static effects.

В предыдущих исследованиях [1], учитывающих пространственные эффекты, получены общие частотные зависимости (ω) модулей собственных значений операторов диэлектрической проницаемости (ϵ_a) и поверхностного импеданса (Z) сверхпроводников. Пространственная неоднородность поля учитывалась в форме волнового числа k в предположении, что задача стационарна. С учётом отсутствия потерь на постоянном токе получены зависимости $Z \sim \omega$ и $\epsilon_a \sim 1/\omega^2$, которые следуют из поведения поперомоторных сил, оказываемых полем на систему носителей тока. Иллюстрацией может являться выражение пространственной составляющей плотности тока

$$j_0(\theta, r) = j_0(\theta) e^{i\kappa r}, \quad (1)$$

возникающей после внешнего возбуждения с учётом пространственной дисперсии

$$E = E_0 e^{i(kr + \omega t)}, \quad (2)$$

которое может быть преобразовано к виду

$$j_0(\theta, r, t) = j_0(\theta) e^{-\omega'_k t} e^{i(\kappa r \pm \omega''_k t)}. \quad (3)$$

В сверхпроводнике отсутствуют потери на постоянном токе ($\omega'_k = 0$) и выражение для стационарного тока (1) может быть опять восстановлено из (3), например, путём усреднения по времени плазменных колебаний с

положительным и отрицательным знаками частоты плазмонных поляритонов ω''_k и надлежащего конечного временного сдвига моментов начала их действия.

В резонансно-туннельных диодных (РТД) наноструктурах вместо плотности тока (1) и (3) могут быть записаны аналогичные соотношения для приложенного к структуре напряжения вследствие их малой проводимости. При этом в выражении для приложенного напряжения частоты плазменных колебаний с положительным и отрицательным знаками частоты плазмонных ЛО-поляритонов ω''_k суммируются. Результат соответствует появлению фоновых повторений резонансного пика тунnelирования при постоянных напряжениях, соответствующих двум ЛО-фонам [2] (рис. 1).

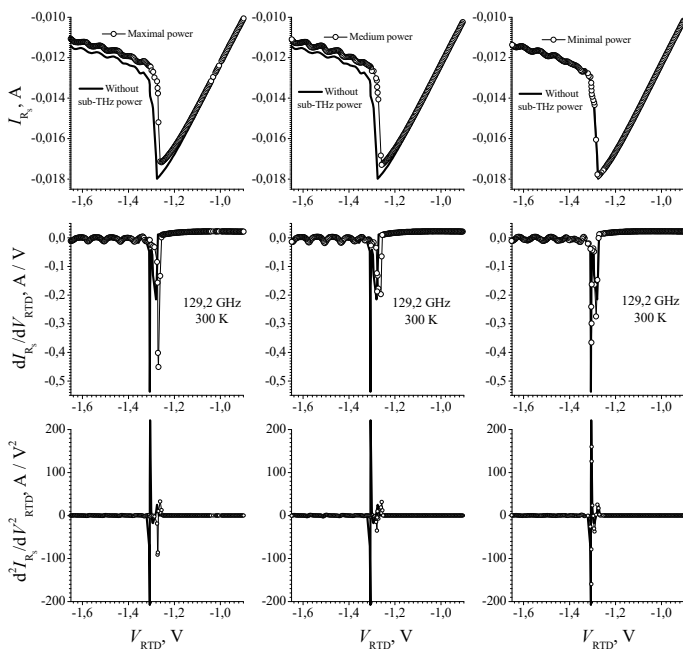


Рис. 1. ВАХ, её первая и вторая производные для РТД при наличии и в отсутствие СВЧ

Литература

1. N.A. Volchkov, A.L. Karuzskii, V.A. Kulbachinskii et al., J. Phys.: Conf. Ser., **969**, 012078 (2018).
2. А.А. Алексанян и др., Мокеровские чтен.: сб. трудов, М.: МИФИ, 99 (2020), 45 (2021).

ДВУХФОТОННЫЙ ДИЗАЙН ДЛЯ ТГц КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ: ОТ ИДЕИ ДО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

**Р.А. Хабибуллин^{1,2}, А.А. Афоненко³, Д.В. Ушаков³, С.С. Пушкарёв^{1,2}, Р.Р. Галиев^{1,2},
Д.С. Пономарев¹, И.С. Васильевский⁴, А.Н. Клочков⁴, А.Н. Виниченко⁴, М.А. Ладугин⁵,
Т.А. Багаев⁵, А.А. Мармалюк⁵, К.В. Маремьянин⁶, В.И. Гавриленко⁶*

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН,
Москва, Нагорный проезд, дом 7, 117105, e-mail: khabibullin@isvch.ru

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

³Белорусский государственный университет,
Белоруссия, Минск, пр. Независимости, 4220030

⁴Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Каширское ш., 31, Москва, 1115409

⁵АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», ул. Введенского, 3, Москва, 117342

⁶Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, Нижний Новгород, 607680

TWO-PHOTON DESIGN FOR THz QUANTUM CASCADE LASERS: FROM IDEA TO EXPERIMENTAL DEMONSTRATION

**R.A. Khabibullin^{1,2}, A.A. Afonenko³, D.V. Ushakov³, S.S. Pushkarev^{1,2}, R.R. Galiev^{1,2},
D.S. Ponomarev¹, I.S. Vasil'evskii⁴, A.N. Klochkov⁴, A.N. Vinichenko⁴, M.A. Ladugin⁵,
T.A. Bagaev⁵, A.A. Marmalyuk⁵, K.V. Maremyanin⁶, V.I. Gavrilenko⁶*

¹V.G. Mokerov Institute of ultra-high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, Moscow, Nagornij proezd 7, 117105 e-mail: khabibullin@isvch.ru

²Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia, 194021

³Belarusian State University, Belarus, 220030, Minsk, Nezavisimosti prospect, 4, 4220030

⁴National research nuclear university Mephi, Moscow, Russia, 1115409

⁵POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow, Russia, 117342

⁶Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, Russia, 607680

A new lasing scheme with sequential two-photon emission in the gain module for terahertz quantum cascade laser (THz QCL) is proposed and experimentally demonstrated. Unlike the conventional lasing scheme with only one pair of laser levels, here electrons pass through an additional laser level, which is the lower laser level for the first radiation transition and upper laser level for the second one, forming a sequence “resonant tunneling – photon – photon – phonon”. The presence of two-photon emission in the gain module reduces the gain saturation with an increase in photon density, which should potentially increase the radiation power. An optimized two-photon design based on GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As four-quantum wells was grown by two epitaxial techniques – molecular beam epitaxy (MBE) and metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). THz QCLs based on both MBE and MOCVD structures have a lasing frequency of 3.8 THz and maximum operation temperature around 100 K. We believe that the proposed design can significantly improve

the performance of low-frequency THz QCLs and increase the output power of QCLs operating in the THz range.

В работе предложена и экспериментально реализована новая схема работы ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) с последовательным испусканием двух фотонов в одном усиливающем модуле. В отличие от традиционной схемы с одной парой лазерных уровней, в предложенной схеме электроны совершают переход через дополнительный энергетический уровень, который является нижним лазерным уровнем для первого излучательного перехода и верхним лазерным уровнем для второго излучательного перехода (см. рис. 1). Это приводит к прохождению электронов в усиливающем модуле по схеме “резонансное туннелирование – фотон – фотон – фонон”. На основе предложенной схемы был оптимизирован двухфотонный дизайн ТГц ККЛ с активным модулем (инжектор и усиливающий модуль) из четырех туннельно-связанных квантовых ям GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As с максимумом усиления вблизи 3.8 ТГц. Лазерные структуры с активной областью на основе двухфотонного дизайна были выращены с помощью двух эпитаксиальных методик – молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ). Изготовленные ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом на основе золота продемонстрировали хорошую толерантность к ростовым методам, поскольку спектры излучения лазеров на МЛЭ- и МОСГЭ-структурах очень близки (см. рис. 2).

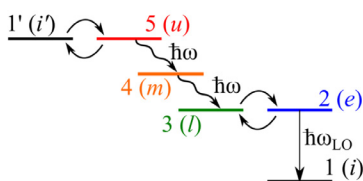


Рис. 1. Схема уровней двухфотонного дизайна для ТГц ККЛ с резонансно-фононным опустошением

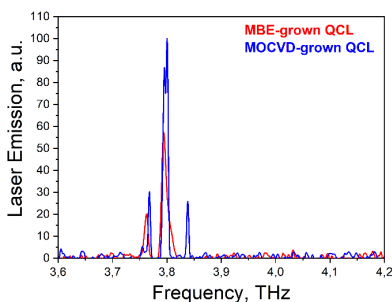


Рис. 2. Спектры излучения ККЛ с двухфотонным дизайном, выращенные методами МЛЭ и МОСГЭ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-72-30020.

СИСТЕМЫ МНОГОПИКСЕЛЬНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНЫХ МАССИВОВ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН

^{}Д.С. Пономарев^{1,2}, Д.В. Лаврухин¹, А.Э. Ячменев¹, Р.А. Хабибуллин¹,
К.И. Зайцев², И.Е. Спектор², М. Скоробогатый³*

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт
сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН
Россия, 117105, г.Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр.5, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

³Политехническая школа Монреаля, Canada, Montréal, 500 Chem. de Polytechnique

MULTIPIXEL TERAHERTZ IMAGING VIA 2D PCA ARRAYS

^{}D.S. Ponomarev^{1,2}, D.V. Lavrukhin¹, A.E. Yachmenev¹, R.A. Khabibullin¹,
K.I. Zaytsev², I.E. Spektor², M. Skorobogatyi³*

¹V.G. Mokerov Institute of ultra-high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorniy proezd 7, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Vavilova st. 38

³École Polytechnique de Montréal, Canada, Montréal, 500 Chem. de Polytechnique

We report on a novel experimental approach for spatial-resolved THz spectroscopy and parallelized high-speed THz imaging. By using a spatial light modulator and a 64-pixel detector comprising a 2D photoconductive antenna array, one can provide an increased multichannel detection of THz waves with high-acquisition rate. We believe the findings of our research lie in the field of modern THz instruments and can be thoroughly used for the demands of spectroscopic and imaging application in THz frequency range.

В работе предложен новый экспериментальный подход по визуализации объектов в терагерцовом (ТГц) диапазоне частоты, основанный на использовании пространственно-временного модулятора света и матричного приемника на основе двумерного массива фотопроводящих антенн (ФПА) для одномоментного считывания нескольких пикселей в массиве. Показаны пилотные исследования по ТГц визуализации на примере амплитудных и фазовых масок.

ФПА на основе полупроводниковых материалов активно используются для генерации и детектирования электромагнитного излучения ТГц диапазона, в том числе для создания систем многоканальной спектроскопии и визуализации [1–5]. В работе предложен и изготовлен 64 пиксельный (8 каналов x 8 пикселей) детектор на основе двумерного массива дипольных ФПА, изготовленного на поверхности LT-GaAs. Матричный де-

тектор интегрирован в схему импульсного ТГц спектрометра, где для управления считыванием амплитуды и фазы ТГц импульса используется пространственный модулятора зондирующего лазерного излучения – таким образом из каждой строки можно считать любой пиксель.

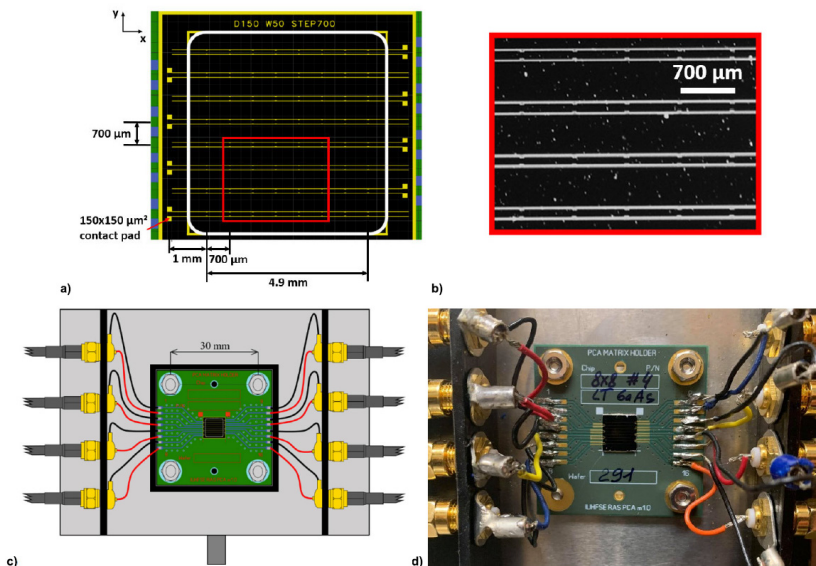


Рис. 1. Схема 2D массива на основе дипольных ФПА (а), снимок с электронного микроскопа с изображением 8 каналов массива (б), схема матричного приемника (с) и матричный приемник в оснастке для проведения ТГц измерений (д)

Исследования проводилось при финансовой поддержке гранта РНФ 18-79-10195.

Литература

1. A.E. Yachmenev et al., Optical Engineering (a review), **59**(6), 061608 (2019).
2. A.E. Yachmenev et al., Prog. Cryst. Gr. Character. Mat., **66**(2), 100485 (2020).
3. D.S. Ponomarev et al., Journal of Applied Physics, **125**, 151605 (2019).
4. D.V. Lavrukhin et al., Semicond. Sci. Technol., **34**, 034005 (2019).
5. D.V. Lavrukhin et al., IEEE Trans. THz. Sci. Technol., **11**(4), 417 (2021).

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДОВОЙ КОНВЕРСИИ В 3.3 ТГц
КВАНТОВО-КАСКАДНОМ ЛАЗЕРЕ**

****С.С. Пушкарёв¹, Р.Р. Галиев¹, Н.В. Шаврук¹, И.Н. Дюзжиков², В.В. Павловский²,
О.Ю. Волков², Р.А. Хабибуллин¹***

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова, РАН,
Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, дом 7, e-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, 11

MODE CONVERSION EFFICIENCY IN 3.3 THz QUANTUM-CASCADE LASER

****S.S. Pushkarev¹, R.R. Galiev¹, N.V. Shchavruk¹, I.N. Dyuzhikov², V.V. Pavlovskiy²,
O.Yu. Volkov², R.A. Khabibullin¹***

¹V.G. Mokerov Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics of RAS,
Russia, 123456, Moscow, Nagornij proezd 7, e-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

²Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS,
Russia, 125009, Moscow, Mokhovaya str., 11

The article discusses the possibilities of controlling the conversion of low-energy modes to high-energy ones in THz QCLs by changing the operating temperature and parameters of the injection current pulses: amplitude, duration, and repetition rate. For the first time, the study of intensity transfer between longitudinal Fabry – Perot modes in THz QCLs with a change in the duty cycle of injection current pulses has been carried out.

Спектр импульсного ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) # 21212 с резонатором Фабри-Перо длиной 2.8 мм состоит из нескольких (в общем случае – шести) продольных мод *A, B, C, D, E, F* с эквидистантно увеличивающимися частотами, где *F* мода имеет наибольшую частоту. Интервал между соседними модами немного изменяется в зависимости от режима работы лазера (температура лазера, амплитуда импульсов тока инжекции) и составляет в среднем 12.6 ГГц. При определённых режимах в спектре слева от мод *F* и *E* появляются моды *F'* и *E'*, не входящие в набор мод резонатора Фабри-Перо. Суммарная интенсивность излучения неравномерно распределена между этими модами: в частности, когда лазер излучает с максимальной суммарной интенсивностью ($2.647 \cdot 10^{-5}$ усл. ед. при $T = 51$ К, $J = 3.165$ А, скважности 1000, импульсе 2 мкс), она практически полностью сосредоточена в моде *C* с частотой $3.289 \div 3.291$ ТГц.

Спектры излучения ККЛ были измерены методом Фурье-спектроскопии на спектрометре Bruker Vertex 80v в ИРЭ РАН.

Известно, что возбуждать более высокочастотные продольные моды можно с помощью увеличения температуры лазера в криостате и с помо-

щью увеличения амплитуды импульсов тока инжекции. Однако при этом эффективность возбуждения, определяемая как интенсивностью моды, так и отношением интенсивности моды к общей интенсивности излучения ККЛ, весьма невелика. Из рис. 1 видно, что точки, соответствующие «температурному» и «токовому» возбуждению мод E и F , лежат вдали от верхнего правого угла диаграммы.

Высокочастотные моды можно возбуждать ещё двумя способами: а) увеличением длительности импульса тока τ , при этом коэффициент заполнения цикла $D = \tau/T = \text{const}$, средний ток инжекции $\langle J \rangle = \text{const}$; б) увеличением коэффициента заполнения цикла $D = \tau/T$ посредством уменьшения периода чередования импульсов тока T , при этом длительность импульса $\tau = \text{const}$, средний ток инжекции $\langle J \rangle$ увеличивается, следовательно, и инжектируемая в лазер мощность увеличивается. Из рис. 1 видно, что особенно эффективная модовая конверсия достигается в случае б).

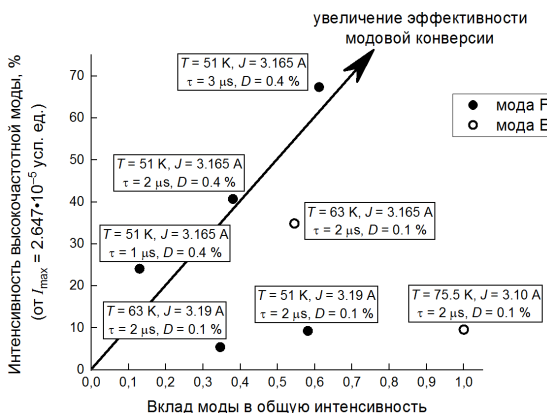


Рис. 1. Диаграмма эффективности возбуждения высокочастотных мод

Экспериментальные зависимости мощности и частоты различных мод от коэффициента заполнения цикла D позволяют сделать вывод о сочетании постепенного повышения температуры активной области лазера и скачкообразной перестройки электронной подсистемы, которая происходит после превышения инжектируемой в лазер электрической мощностью некоторого порогового значения (при $D = 0.13 \%$).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-72-30020.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК 2.2 ТГц
КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА С ДВУХСЕКЦИОННЫМ РЕЗОНАТОРОМ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТОКА**

**А.К. Долгов¹, Р.Р. Галиев^{1,2}, С.С. Пушкарёв^{1,2}, А.А. Афоненко³, Д.В. Ушаков³,
О.Ю. Волков⁴, В.В. Павловский⁴, И.Н. Дюжиков⁴, *Р.А. Хабибуллин^{1,2}**

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова
РАН, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5, e-mail: khabibullin@isvch.ru

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

³Белорусский государственный университет, 220030, Минск, пр. Независимости, 4

⁴Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11

**INVESTIGATION OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF A 2.2 THz
QUANTUM-CASCADE LASER WITH A TWO-SECTION CAVITY DEPENDING
ON TEMPERATURE AND CURRENT**

**A.K. Dolgov¹, R.R. Galiev^{1,2}, S.S. Pushkarev^{1,2}, A.A. Afonenko³, D.V. Ushakov³,
O.Yu. Volkov⁴, V.V. Pavlovsky⁴, I.N. Dyuzhikov⁴, *R.A. Khabibullin^{1,2}**

¹V.G. Mokerov Institute of ultra-high frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, Moscow, Nagornij proezd 7, 117105, e-mail: khabibullin@isvch.ru

²Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia, 194021

³Belarusian State University, Belarus, 220030, Minsk, Nezavisimosti prospect, 4, 4220030

⁴Institute of Radio Engineering and Electronics. V.A. Kotelnikova RAS,
125009, Moscow, st. Mokhovaya, 11

This paper presents the results of a study of the spectral characteristics of a 2.2 THz quantum cascade laser (QCL) with Fabry-Perot resonator, consisting of two optically coupled sections – amplifying and passive, separated by an air gap 3 μm wide. The active region of THz QCLs is based on tunnel-coupled GaAs/AlGaAs quantum wells (QWs) with an aluminum content of 15% in the barrier layers. The spectral characteristics of fabricated two-section THz QCLs were studied as functions of temperature and current. Maps of transitions from single-mode radiation to multimode radiation are constructed depending on the pump current and the operating temperature of the laser. The “single-mode/multimode” transition is explained by the change in the Lorentz contour of the broadening of the gain spectrum of the laser active medium with increasing current/temperature.

В работе представлены исследования двухсекционного ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) на основе двойного металлического волновода с резонатором Фабри-Перо, который представляет собой две оптически связанные секций – усиливающую и пассивную, разделенных воздушным

зазором шириной 3 мкм. Исследуемый ТГц ККЛ имел активную секцию с длиной $L_1 = 1.8$ мм и пассивную секцию с длиной L_2 от 200 до 300 мкм. Таким образом, общая длина составного резонатора Фабри-Перо составляла около 2 мм. Из изготовленных кристаллов были выколоты сформированные плазмохимическим травлением двухсекционные резонаторы, которые далее монтировались на теплоотводе. Активная секция лазеров была разварена золотой проволокой. Активная область ТГц ККЛ основана на туннельно-связанных квантовых ямах (КЯ) GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As с резонансно-фононным механизмом депопуляции нижнего лазерного уровня. Были рассчитаны спектры усиления/потерь в двухсекционном ТГц ККЛ (см. рис. 1а, б). Пассивная секция резонатора приводит к модуляции потерь с амплитудой модуляции около 1.3 см^{-1} , что обеспечивает селекцию продольных мод в резонаторе. Соприкосновение на графике контура усиления моды с уровнем потерь (условие равенства $G = \alpha$) соответствует генерации данной моды излучения. Расчёты показали, что при увеличении уширения лоренцевского контура усиления γ с 1 до 2 мэВ резко сокращается количество касаний, обеспечивающих выполнение условия $G = \alpha$. Таким образом, переход «одномод-многомод» в двухсекционном ККЛ при изменении температуры/тока связан с уширением контура усиления активной среды.

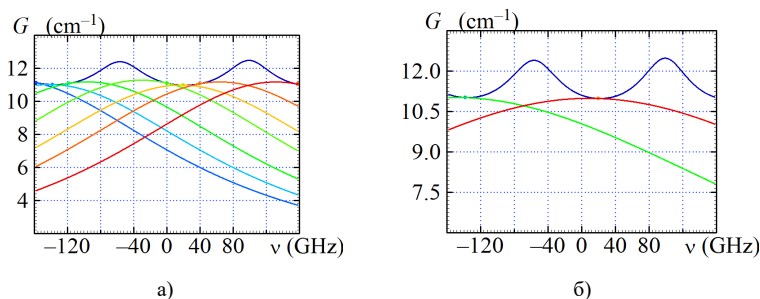


Рис. 1. Спектр потерь (волнистая кривая) и семейство спектров усиления мод в составном резонаторе с лоренцевским контуром уширения а) $\gamma = 1$ мэВ; б) $\gamma = 2$ мэВ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-72-30020.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ СВЕТОВОЙ НАКАЧКИ В ОПТИКО-ТЕРАГЕРЦОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОФИЛИРОВАННЫХ САПФИРОВЫХ ВОЛОКОН

**Н.В. Зенченко^{1,2}, Д.В. Лаврухин¹, Т.В. Фролов²,
Г.М. Катыба⁴, Р.А. Хабидуллин^{1,2}, К.И. Зайцев³, Д.С. Пономарев¹*

¹Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр.5,

e-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН
Россия, 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2

LOCALIZATION OF A LIGHTWAVE IN AN OPTICAL-TO-TERAHERTZ CONVERTER VIA SAPPHIRE FIBERS

**N.V. Zenchenko^{1,2}, D.V. Lavrukhin¹, T.V. Frolov²,
G.M. Katyba⁴, R.A. Khabibullin^{1,2}, K.I. Zaytsev³, D.S. Ponomarev¹*

¹V.G. Mokerov Institute of ultrahigh frequency semiconductor electronics of RAS
Russia, 117105 Moscow, Nagorniye proezd 7, e-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru

²Bauman Moscow State Technical University
Russia, 105005 Moscow, 2nd Bauman st. 5

³Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Vavilova st. 38

⁴Osipyan Institute of Solid State Physics RAS
Russia, 142432 Chernogolovka, 2 Academician Osipyan str.

We present a new type of a sapphire-fiber lens with subwavelength resolution with high refractive index in a wide range of the electromagnetic spectrum (from optics to far-IR and THz radiation). The lens is placed on the surface of the photoconductive antenna-emitter, and is designed to enhance the generation of THz radiation.

Предложено использование нового типа линзы с субволновым разрешением на основе профилированных сапфировых волокон, имеющих высокий показатель преломления в широком диапазоне электромагнитного спектра (от оптики до дальнего ИК и ТГц излучения). Линза предназначена для усиления генерации терагерцового (ТГц) излучения фотопроводящей антенной (ФПА).

Эффективность работы ФПА-излучателей ограничена тем, что лишь малая доля энергии импульса лазерной накачки преобразуется в электромагнитные колебания ТГц диапазона [1]. Мы предложили новый тип фокусирующей линзы на основе профилированных сапфировых волокон [2] для концентрации оптического излучения в зазоре ФПА. Линза позволяет

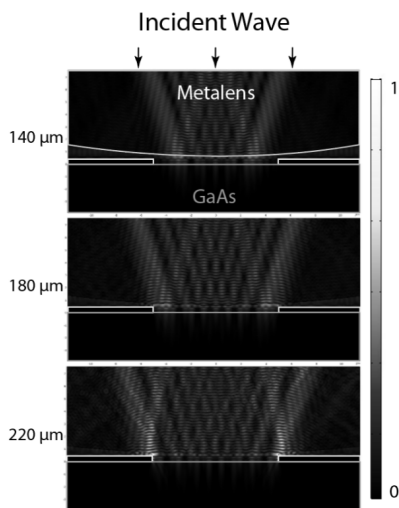


Рис. 1. Результаты моделирования распределения электромагнитного поля в зазоре ФПА для линзы с разным диаметром сапфирового волокна (140÷220 мкм)

сфокусировать лазерный импульс накачки близи электродов антенны, пространственно перераспределяя плотность фотовозбужденных носителей заряда в зазоре антенны путем изменения диаметра волокна [3].

Построенная модель позволила получить распределение электромагнитного поля в зазоре ФПА с различными диаметрами линз. Нормированное распределение электромагнитного поля в зазоре ФПА представлено на рис. 1.

Создан экспериментальный стенд для юстировки линзы, который совмещается с лабораторным импульсным ТГц спектрометром для исследования процессов генерации ТГц излучения в ФПА с предложенной линзой.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-79-10240.

Литература

1. A.E. Yachmenev et al., Optical Engineering, **59**(6), 061608 (2019).
2. G.M. Katyba et al., Progress in Cryst. Gr. and Charact. of Mat., **64**(4), 133 (2018).
3. D.S. Ponomarev et al., Optics Letters, **47**(6), in press, DOI: 10.1364/OL.452192.

**РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОПРОВОДЯЩЕЙ АНТЕННЫ
С ПЛАЗМОННЫМИ ЗОЛОТЫМИ НАНООСТРОВКАМИ И НАНОСТЕРЖНЯМИ
В ТГц ОБЛАСТИ**

****С.А. Номоев¹, И.С. Васильевский¹, А.Н. Виниченко¹***

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409, Тел. 8(915)426-99-86
e-mail: serganom@gmail.com

**DESIGN AND MANUFACTURE OF PHOTOCONDUCTING ANTENNA
WITH PLASMON GOLD NANOSLANDS AND NANORODS IN THE THz REGION**

****S.A. Nomoev¹, I.S. Vasil'evskii¹, A.N. Vinichenko¹***

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
Kashirskoe highway 31, Moscow, 115409, Tel. 8(915)426-99-86
e-mail: serganom@gmail.com

Terahertz photoconductive antenna with two electrodes, integrated with an array of plasmonic nanoislands to increase surface absorption and enhance terahertz wave generation. It is necessary to design a structure that can effectively match the phases of the external laser and the surface, which can maximize the conversion efficiency of light into THz radiation. It is shown that by carefully matching the plasmon resonance wavelength of the developed plasmon structure with the wavelength of the incoming laser radiation ($\lambda = 780$ nm), almost ideal absorption can be obtained. The developed plasmon structure ensures the absorption of light and the generation of photocarriers mainly on the surface of the GaAs substrate, which is very beneficial due to the fact that surface charge carriers have a minimum distance to the antenna leads which leads to the lowest probability of recombination. The proposed structure is numerically investigated by finite element modeling based on the Maxwell wave equation for optical interaction, the drift-diffusion equation.

Источники и детекторы терагерцового (ТГц) излучения являются базовыми компонентами систем высокоскоростной беспроводной связи, медицинской диагностики, бесконтактного контроля качества материалов и дистанционного обнаружения опасных объектов. Разработка, исследование подобных источников – новое, перспективное направление в современной электронике [1].

Разработана, численно промоделирована и изготовлена фотопроводящая антенна (ФПА) на основе низкотемпературного арсенида галлия с плазмонными наноструктурами и наностержнями. Представленное устройство схематически изображено на рис.1. Как видно, предлагаемая

ТГц-ФПА состоит из двух металлических электродов поверх подложки LT-GaAs, разделенных зазором 21 мкм, куда помещены наноостровки и наностержни для увеличения поверхностного поглощения и усиления генерации терагерцовых волн.

Разработанная структура позволяет эффективно согласовывать фазы внешнего лазера и поверхности, что способствует увеличению эффективности преобразования света в терагерцовое излучение. Показано, что путем согласования длины волны плазмонного резонанса, разработанной плазмонной структуры, с длиной волны падающего лазерного излучения ($\lambda = 780$ нм), можно получить практически идеальное поглощение. Разработанная плазмонная структура обеспечивает поглощение света и генерацию фотоносителей в основном на поверхности подложки GaAs, что является предпочтительным с точки зрения минимизации вероятности рекомбинации, поскольку поверхностные носители заряда имеют минимальное расстояние до выводов антенны. Предлагаемая структура численно исследована методом конечных элементов на основе волнового уравнения Максвелла для оптического взаимодействия, уравнения дрейф-диффузии.

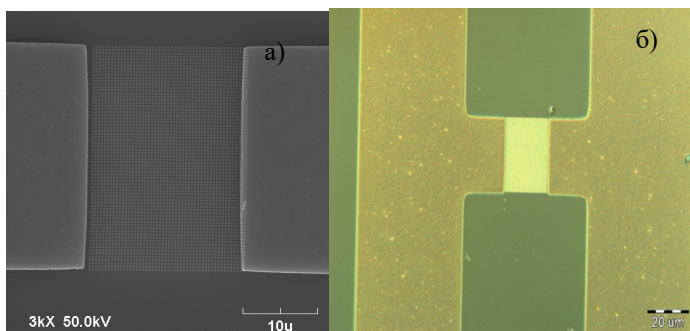


Рис. 1. а) Изображения, полученные в электронном микроскопе плазмонных наноостровков после нанесения титана с золотом, б) ФПА после осаждения просветляющего покрытия Si_3N_4 толщиной 100 нм

Литература

1. S. Nomoev, et al., Technical Physics Letters, **44**, 44-46 (2018).

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ДИСУЛЬФИДА И ДИСЕЛЕНИДА РЕНИЯ

^{}Л.С. Хорошко^{1,2}, ^{*}А.В. Баглов^{1,2}*

¹Белорусский государственный университет

Беларусь, 220030, г. Минск, Проспект Независимости, дом 4, e-mail: khoroшко@bsu.by

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: baglov@bsu.by

STRUCTURAL PROPERTIES OF A RHENIUM DISULFIDE AND DISELENIDE

^{}L.S. Khoroshko^{1,2}, ^{*}A.V. Baglov^{1,2}*

¹Belarusian State University

Belarus, 220030 Minsk, Nezavisimosti Av. 44, e-mail: khoroшко@bsu.by

²Belarusian State University Informatics and Radioelectronics

Belarus, 220013 Minsk, Browka P. str. 6, e-mail: baglov@bsu.by

This paper present compares a result of a first-principles study of structural properties of a rhenium disulfide and diselenide with an experiment for rate possibilities correct describing these materials in numerical experiments within density functional theory and local density approximation. The accordance between calculated and experimental is good for the ReS_2 case and decrease for the ReSe_2 case. As the authors suggest, these results can be explained by errors in the modeling process and imprecise experimental data.

Дихалькогениды тугоплавких металлов (ДТМ), такие как MoS_2 и WS_2 привлекательны для создания различных элементов электронной техники, в частности транзисторов, благодаря сочетанию слоистой структуры и уникальных электронных свойств [1]. В это же время дихалькогениды рения изучены в значительно меньшей степени, хотя проведенные эксперименты демонстрируют наличие у данных материалов подходящих свойств для изготовления солнечных элементов, (фото)катализаторов, электронных компонентов и др. Определенные сложности для экспериментальной работы создает малая доступность рения, а также его высокая химическая стойкость. Это объясняет повышенный интерес к описанию структурных свойств ReS_2 и ReSe_2 первопринципными методами.

Целью данной работы является изучение структурных свойств ReS_2 и ReSe_2 в объемном состоянии методом численного моделирования в рамках теории функционала плотности и теории псевдопотенциала, реализованных в пакете *OpenMX* [2, 3]. Расчеты проведены с использованием приближения локальной плотности (ПЛП), т.к. в его рамках удается кор-

ректно описать структурные свойства слоистых материалов, в том числе MoS_2 и WS_2 .

Результаты моделирования структурных свойств ReS_2 и ReSe_2 представлены в таблице 1. Для ReS_2 получено хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных как для параметров решетки, так и для ее углов. В случае ReSe_2 величины отклонений возрастают одновременно для параметров решетки и для углов, что требует осторожного обращения с данными моделирования при их интерпретации, а также дополнительных экспериментальных исследований. Однако общая тенденция увеличения параметров решетки ReSe_2 в сравнении с ReS_2 сохраняется.

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные структурные свойства ReS_2 и ReSe_2

Источник данных	Параметр решетки			Углы решетки		
	a , Å	b , Å	c , Å	α , °	β , °	γ , °
ReS_2						
Расчет	6,422	6,470	6,408	121,47	88,17	106,43
Эксперимент [4]	6,461	6,417	6,510	121,10	88,38	106,47
ReSe_2						
Расчет	6,663	6,711	6,652	121,59	88,23	105,95
Эксперимент [5]	6,728	6,602	6,716	118,94	91,82	104,90

Анализируя полученные данные, можно утверждать, что использование ПЛП в рамках теории функционала плотности при исследовании структурных свойств ReS_2 и ReSe_2 позволяет получать хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными для ReS_2 с понижением точности при описании ReSe_2 . Данный эффект может быть связан с погрешностями, вносимыми как параметрами проведения численного моделирования, так и обработкой экспериментальных данных. Моделирование в рамках ПЛП может быть востребовано для изучения ReS_2 и его твердых растворов в составе гетероструктур с другими ДТМ, а также при моделировании приборных структур на его основе.

Литература

1. F. Wu et al., Nature, **603**, 259-264 (2022).
2. T. Ozaki, Phys. Rev. B, **67**, 155108 (2003).
3. T. Ozaki, Phys. Rev. B, **69**, 195113 (2004).
4. H.N. Murrays et al., Inorganic Chemistry, **33**, 4418 (1994).
5. J.C. Wildervanck et al., Journal of the Less Common Metals, **24**, 73 (1971).

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ТИТАНАТА БАРИЯ-ЕВРОПИЯ

**Л.С. Хорошко^{1,2}, *А.В. Баглов^{1,2}, И.А. Свито², О.В. Королик²*

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: l.s.khoroshko@gmail.com

²Белорусский государственный университет, физический факультет
Беларусь, 220030, г. Минск, проспект Независимости, 4, e-mail: baglov@bsu.by

LUMINESCENT AND STRUCTURAL PROPERTIES OF BARIUM-EUROPIUM TITANATE

**L.S. Khoroshko^{1,2}, *A.V. Baglov^{1,2}, I.A. Svito², O.V. Korolik²*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013, Minsk, P.Browka str., 6, e-mail: l.s.khoroshko@gmail.com

²Belarusian State University, Faculty of Physics
Belarus, 220030, Minsk, Nezavisimosti Av., 4, e-mail: baglov@bsuir.by

The powder of barium titanate doped with europium was obtained by the sol-gel method with multi-stage annealing. Luminescence analysis showed the emission of Eu^{3+} ions characteristic to synthesized compound and Eu^{2+} ions which might replace Ba^{2+} ions with valence reduction. X-ray diffraction study of the phase composition shows the formation of a monophasic tetragonal Ba-TiO_3 powder without strong identifiable peaks characteristic of cubic EuTiO_3 . As the authors suggest, these results can be explained by the formation of Eu-TiO_3 clusters on the surface of the main phase grains.

Оксидные материалы со структурой перовскита ABO_3 находят широкое применение в качестве различных материалов микро- и оптоэлектроники, в том числе используются в качестве матриц для внедрения люминесцирующих ионов лантаноидов [1]. Легирование европием представляет особый интерес ввиду возможности одновременного наблюдения красной и синей люминесценции ионов Eu^{3+} и Eu^{2+} в материале, что может быть использовано для создания защитных меток и в источниках белого света [2, 3]. Понижение валентности ионов европия в перовскитных матрицах ABO_3 возможно в случае замещения элемента **A**, в то время как традиционно ожидается, что ионы европия занимают нестехиометрические позиции **B** или образуют побочные соединения в виде оксида Eu_2O_3 , что позволяет наблюдать характерную люминесценцию ионов Eu^{3+} с максимумом на 612÷615 нм.

В данной работе титанат бария, легированный европием, получали золь-гель методом из золя на основе ацетатов бария и европия и изопропоксидат титана, как описано в [4]. Для получения порошка осу-

шествляли ступенчатый отжиг ксерогеля на воздухе. Исследование методом рентгеновской дифракции показало типичный для титаната бария набор пиков, свидетельствующий об образовании фазы BaTiO_3 в тетрагональной сингонии (Т- BaTiO_3), относящейся к пространственной группе $R4mm$ (рис. 1а), со средним размером кристаллитов не более $30 \div 50$ нм. При $\lambda_{\text{возб}} = 355$ нм зарегистрирована люминесценция, характерная для ионов Eu^{3+} в кристаллическом окружении и Eu^{2+} , занимающих положение антиструктурного дефекта (рис. 1б), однако, отчетливо разрешающихся линий, характерных для кубического титаната европия (С- EuTiO_3) в дифрактограмме порошка не наблюдается.

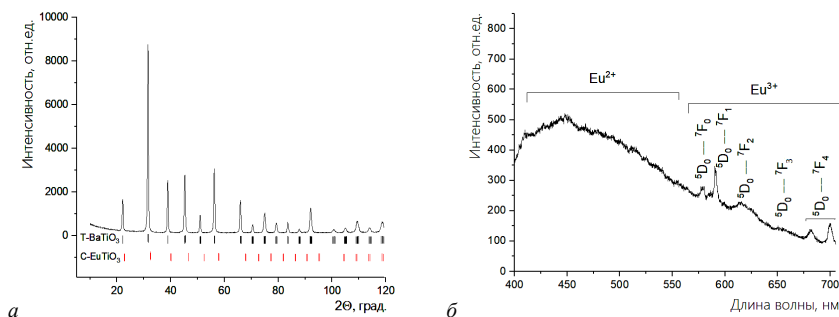


Рис. 1. Дифрактограмма (а) и спектр люминесценции при $\lambda_{\text{возб}} = 355$ нм (б) порошка $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$

Анализируя совокупность полученных данных можно предположить, что титанат европия формируется не в виде объемной составляющей порошка $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$, а в виде кластеров, преимущественно располагающихся на поверхности зерен основной фазы. Данное предположение позволяет объяснить наблюдаемую интенсивную люминесценцию ионов Eu^{2+} и не вступает в противоречие с результатами рентгеновской дифракции, свидетельствующих о формировании монофазного материала. Такие композиты, демонстрирующие люминесцентные свойства наряду с сегнетоэлектрическими, могут найти широкое применение для создания новых оптоэлектронных устройств, элементов энергонезависимой памяти и защитных меток повышенного уровня безопасности.

Литература

1. A. Podhorodecki et al., J. Phys. D: Appl. Phys., **46**, 355302 (2013).
2. M. Peng, G. Hong, J. Lum., **127**, 735 (2017).
3. Qi Shuyun et al., Optical Materials Express, **4**, 396 (2014).
4. N. Gaponenko et al., APSSP: Proc. VIII Int. Sci. conf., **1**, 186 (Minsk, Sept. 24-28, 2018).

ЛЕГИРОВАНИЕ ХПО ГРАФЕНА ХЛОРИДОМ ЖЕЛЕЗА (III)

**Н.Г. Ковальчук¹, И.В. Комиссаров¹, Е.А. Дронина¹, С.Л. Прищепа^{1,2}*

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

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

DOPING CVD GRAPHENE BY IRON (III) CHLORIDE

**N.G. Kovalchuk¹, I.V. Komissarov¹, E.A. Dronina¹, S.L. Prischepa^{1,2}*

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Republic of Belarus, 220013, Minsk, st. Petrusya Brovki 6, e-mail: n.kovalchuk@bsuir.by
²National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe Hwy. 31, Moscow, 115409, Russia

Chemical doping has been shown to be an efficient method for changing the type and concentration of charge carriers. We present the results of our investigations of large area chemical vapor deposition graphene doping using iron (III) chloride (FeCl_3). It is shown that of FeCl_3 can increase the number of charge carriers for single-layer and multilayer graphene fractions. In addition, we demonstrate the change in the transparency of graphene after doping in the visible range.

Множество приложений в электронике и оптоэлектронике требует изменения уровня Ферми в графене. Модификация уровня Ферми может быть осуществлена по средствам переноса заряда в системе графен \ абсорбированные атомы. В данной работе было осуществлено химическое легирование графена хлоридом железа (III).

Графен, содержащий как однослойную, так и многослойную фракции, был синтезирован методом ХПО с использованием газа метана в качестве прекурсора. Перенос графена на заданные подложки Si/SiO₂ и стекло был осуществлен жидкофазным методом с использованием полимерного каркаса. Удаление полимера проводилось комбинированным методом, включающим жидкостное травление и отжиг [1].

Легирование графена хлорным железом проводилось в двухзонном реакторе. Подложки с графеном располагались в зоне с температурой 350 °С. Керамический тигель с хлорным железом располагался в зоне с температурой 320 °С. В процессе легирования реактор продувался потоком аргона с расходом 18 см³/мин. Продолжительность процесса составила 30 минут.

Данные корреляционного анализа положения линии 2D как функции положения линии G спектров комбинационного рассеяния графена до и

после легирования указывают, как на значительное изменение концентрации носителей заряда, так и на увеличение механического напряжения, сжатия. Эффект наблюдается как для однослойной, так и для многослойной фракции графена (рис. 1).

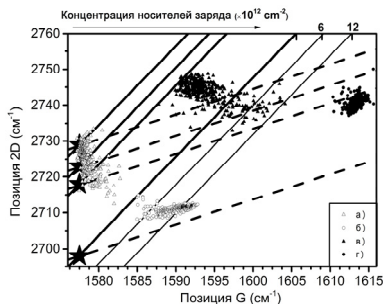


Рис. 1. Корреляционные зависимости положений линии 2D от положений линий G для: а) многослойной фракции графена до интеркаляции; б) однослойной фракции графена до интеркаляции; в) многослойной фракции графена после интеркаляции; г) однослойной фракции графена после интеркаляции

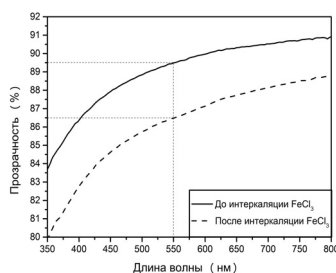


Рис. 2. Оптическая прозрачность графена, перенесенного на стекло, до и после интеркаляции хлорным железом

Кроме того, легирование хлорным железом в таких условиях, приводит к уменьшению прозрачности исследуемого графена с 90.5% до 86.5% для длины волны 550 нм (рис. 2).

Литература

I. N.G. Kovalchuk et al., J. of Appl. Spectroscopy, **84**(6) (2018).

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ХПО ГРАФЕНА ПЕРЕНЕСЕННОГО
С ПОВЕРХНОСТИ МЕДНОГО КАТАЛИЗАТОРА НА ЦЕЛЕВУЮ ПОДЛОЖКУ
ПРИ ПОМОЩИ РАЗЛИЧНЫХ КАРКАСОВ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЖИДКОФАЗНОЙ
И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

***^{*}Е.А. Дронина¹, М.М. Михалик¹, Н.Г. Ковальчук¹, К.А. Нигерिश¹,
А.В. Фельдшерук¹, И.В. Комиссаров¹***

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

**STUDY OF THE STRUCTURE OF CVD GRAPHENE TRANSFERRED FROM COPPER
CATALYST TO THE TARGET SUBSTRATE USING DIFFERENT FRAMEWORKS
WITH SUBSEQUENT LIQUID-PHASE AND THERMAL TREATMENT**

***^{*}L.A. Dronina¹, M.M. Mikhalik¹, N.G. Kovalchuk¹, K.A. Nigirish¹,
A.V. Felsharuk¹, I.V. Komissarov¹***

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Belarus, 220013 Minsk, P. Browka 6, e-mail: lizadronina@yandex.by

In this paper, we present the results of Raman spectroscopy study of the APCVD graphene structure transferred on SiO₂/Si substrate by two different methods (PMMA, paraffin), subjected to liquid-phase and thermal treatment. We demonstrate that the combination of UV treatment, thermal annealing in a vacuum and acetone treatment, for the PMMA transferred graphene effectively affects the decomposition of the polymer residues.

Электрофизические свойства графена, синтезированного методом химического парофазного осаждения (ХПО), во многом определяются наличием возникающих вследствие процесса переноса остатков полимера, которые служат источником дополнительного рассеяния носителей заряда и, таким образом, ограничивают их подвижность и, как следствие, ухудшают характеристики разрабатываемых приборов. В данной работе представлены результаты исследования методом спектроскопии комбинационного рассеяния света структуры ХПО графена перенесенного на поверхность подложки SiO₂/Si при помощи каркаса из парафина (рис. 1а, в) и ПММА (рис. 1б, г), подвергшихся жидкофазной (рис. 1а, б) и термической обработке в Ar/H₂ и вакууме (рис. 1в, г).

На основании данных корреляционного анализа положения полос G и 2D, а также сравнительного анализа спектров комбинационного рассеяния света, установлено, что графен, перенесенный с помощью каркаса из ПММА, подвергшийся экспонированию в ультрафиолете, жидкофазной обработке в ацетоне с последующей термической обработкой в вакууме (рис. 1г) обладает наименьшей концентрацией носителей заряда по срав-

нению с графеном, перенесенным посредством каркаса из парафина (рис. 1в). Также, следует отметить, что смещение экспериментальных точек вдоль линии распределения концентрации носителей заряда (рис. 1а) для образцов графена, перенесенных с помощью каркаса из парафина и прошедших жидкофазную обработку по отношению к исходной структуре (парафин/графен/целевая подложка), свидетельствует о переносе заряда в структуре графен-парафин.

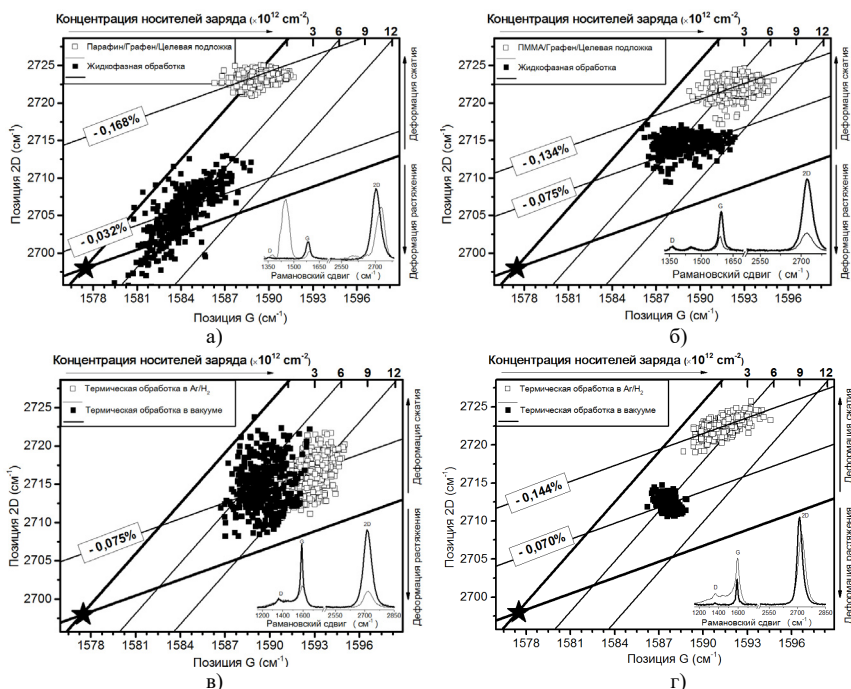


Рис.1. Экспериментальные зависимости положения полосы 2D от положения полосы G для образцов исходного графена, перенесенного с помощью различных каркасов, подвергшихся жидкофазной (а – парафин, б – ПММА) и термической обработке (в – парафин, г – ПММА). На вставках – типичные КР спектры графена; Линии постоянного напряжения и постоянной концентрации носителей заряда проведены согласно работе [1] и [2], соответственно

Литература

1. J. Zabel et al., Nano letters, **12**, 617-621 (2012).
2. J.E. Lee et al., Nature Communications, **3**, 1024 (2012).

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАФЕНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ *AB INITIO* МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Д.Ч. Гвоздовский*

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

OPTICAL PROPERTIES OF GRAPHENE BASED ON *AB INITIO* SIMULATION RESULTS

**D.C. Hvozдовski*

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

Calculations of the optical properties of graphene were carried out using the VASP software package. Frequency-dependent optical properties, including complex permittivity and optical conductivity, were calculated by DFT methods within the independent particle approximation (IPA). It has been found that the spectral peak regions of the real part of the optical conductivity of graphene are in good agreement with the plasmon peaks π and $\pi + \sigma$ found in the experimental and theoretical energy loss spectra at energies of 4.7 and 14.6 eV. The first peak $Re\sigma_{2D}(\omega)$ near 4.2 eV is a consequence of the $\pi \rightarrow \pi^*$ transition in the interband structure. The second peak $Re\sigma_{2D}(\omega)$ from 12.9 to 15.1 eV (at a higher photon energy) is associated mainly with $\sigma \rightarrow \sigma^*$ transitions at the Γ -point. It is necessary to perform additional calculations using the G_0W_0 approach and the Bethe-Salpeter equation ($G_0W_0 + BSE$) for a more accurate analysis of the permittivity of two-dimensional materials.

Растущий интерес к 2D-материалам в фотонике и оптоэлектронике поддерживается многочисленными применениями подобных монослойных материалов, начиная от солнечных элементов и светоизлучающих устройств и заканчивая сенсорными экранами, фотодетекторами и сверхбыстрыми лазерами.

Отклик материала на воздействие электрического поля световой волны полностью определяется его диэлектрической проницаемостью.

Расчеты оптических свойств графена проведены с использованием методов теории функционала плотности (DFT), реализованных в программном комплексе VASP [1, 2]. Электрон-ионное взаимодействие описывалось с помощью метода проекционной расширенной волны (PAW), а обменная и корреляционная энергии (XC) учитывались при использовании функционала GGA [3] в виде псевдопотенциала PBE [4]. Ван-дер-

Ваальсово взаимодействие (vdW) между атомами учитывается при использовании полуэмпирической схемы коррекции дисперсии Грина с поправками Беке и Джонсона (BJ-затухание) [5, 6].

Частотно-зависимые оптические свойства, включая комплексную диэлектрическую проницаемость, показатель преломления, поглощение, отражательную способность были рассчитаны DFT методами в рамках приближения независимых частиц IPA.

Стандартные уравнения, которые применяются для определения оптических свойств кристаллов, не являются корректными для низкоразмерных структур, так как диэлектрическая функция зависит от толщины вакуумного слоя. Для характеристики оптических свойств двумерных материалов используется оптическая проводимость $\sigma_{2D}(\omega)$.

Для графена оптические спектры $Re\sigma_{2D}(\omega)$ стремятся к единице, а кривые для $Im\sigma_{2D}(\omega)$ обращаются в нуль в длинноволновом диапазоне частот. Для частот в широком диапазоне энергий до 20 эВ наиболее важные вариации интенсивностей $\sigma_{2D}(\omega)$ можно просто описать двумя затухающими гармоническими осцилляторами. Первый пик $Re\sigma_{2D}(\omega)$ графена вблизи $\hbar\omega = 4.2$ эВ является следствием $\pi \rightarrow \pi^*$ перехода в межзонной структуре. Второй пик $Re\sigma_{2D}(\omega)$ при более высокой энергии фотонов (от 12.9 до 15.1 эВ) связан в основном с $\sigma \rightarrow \sigma^*$ переходами в точке Г. Межзонные переходы вдоль линий высокой симметрии Г-К и Г-М в основном отвечают за уширение пика в высокоэнергетическом спектре оптической проводимости графена.

Для более точного анализа диэлектрической проницаемости двумерных материалов необходимо проведение дополнительных расчетов с использованием подхода G_0W_0 и уравнения Бете-Солпитера ($G_0W_0 + BSE$). Данный подход позволяет проводить расчеты с учетом эффектов как электрон-электронной, так электронно-дырочной корреляций.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта 3.02.3 в рамках ГПНИ «Конвергенция – 2025» и гранта БРФФИ для молодых ученых «Наука М – 2021» (договор № Ф21М-122).

Литература

1. G. Kresse and J. Furthmüller, Physical review B, **54**(16), 11169 (1996).
2. G. Kresse and J. Furthmüller, Computational materials science, **6**(1), 15-50 (1996).
3. M.G. Medvedev, I.S. Bushmarinov et al., Science, **355**(6320), 49-52 (2017).
4. J.P. Perdew, K. Burke and M. Ernzerhof, Physical review letters, **77**(18), 3865 (1996).
5. S. Grimme, J. Antony, S. Ehrlich and S. Krieg, J. Chem. Phys., **132**, 154104 (2010).
6. S. Grimme, S. Ehrlich and L. Goerigk, J. Comp. Chem., **32**, 1456 (2011).

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В ПЛЕНКАХ
ГЕКСАГОНАЛЬНОГО ПОЛИМОРФА SrSi_2**

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

¹НИИ «Курчатовский институт»

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

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

ELECTRON STATES IN FILMS OF HEXAGONAL SrSi_2 POLYMORPH

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

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”

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

Elemental 2D materials have shown great promise as successors of conventional silicon technology, numerous novel thermal, optic and electronic properties of these materials being the crux of growing interest. Applications of 2D materials in electronics, optoelectronics and energy storage are particularly important [1]. Stoichiometric layered silicene materials draw particular attention due to unique electron properties and compatibility with silicon technology. Here, we report synthesis and characterization of silicene-based films of hexagonal SrSi_2 polymorph manifesting different electron states viz. the chiral anomaly, weak localization, 3D and 2D strong localization, controlled by the film thickness.

Простые двумерные материалы – графен, силицен, германен – рассматриваются как перспективная замена традиционной кремниевой технологии. Они находят широкое применение в электронике, оптоэлектронике и хранении энергии [1]. Естественным развитием данной области является создание слоистых материалов, представляющих собой перемежающиеся слои двумерного материала и металла-интеркалянта. Для подобных систем характерна зависимость электронной структуры от количества слоев в материале [2], сложная магнитная структура при интеркаляции магнитными атомами [3], высокая подвижность носителей [4]. В частности, особый интерес представляют стехиометрические соединения силицена. Предполагается, что эти соединения могут быть интегрированы с современной кремниевой технологией. Стехиометрические соединения силицена EuSi_2 и GdSi_2 известны зависимостью электронной и магнитной структуры от количества слоев в материале [2, 3].

В данной работе представлены результаты исследований электронных состояний в пленках стехиометрического соединения SrSi_2 со структурой силициновых слоев, интеркалированных атомами стронция, в зависимости от их толщины. Состояния носителей в SrSi_2 претерпевают изменения от хиральной аномалии в толстых пленках до все более сильной локализации носителей в пределе нескольких слоев. Наличие хиральной аномалии в толстых пленках подтверждено отрицательным продольным магнитосопротивлением, достигающим нескольких процентов в поле 9 Тл, и зависимостью магнитосопротивления от угла между электрическим и магнитным полями. При низких температурах и малых магнитных полях магнитосопротивление имеет теоретически предсказанный параболический вид [5].

В тонких пленках выделяются 3 различных электронных состояния, соответствующих слабой локализации, 3D и 2D сильной локализации. Слабая локализация характерна для ряда толщин, однако локализация усиливается с уменьшением толщины вплоть до трех монослоев. При этом наблюдается характерная линейная зависимость $\rho_{xx}(\log T)$. В сверхтонких пленках (1, 2 монослоя) наблюдаемая проводимость на 12 порядков меньше, чем в объемных пленках, что является следствием сильной локализации носителей. Температурная зависимость удельного сопротивления в тонких пленках описывается моделью Мотта для прыжковой проводимости $\rho_{xx} \sim \exp(T^{-\beta})$, где для размерности d параметр $\beta = 1/(d+1)$. Для пленки толщиной 2 слоя параметр $\beta \approx 1/4$, что соответствует 3D сильной локализации, в то время как для пленки толщиной в 1 слой параметр $\beta \approx 1/3$, что свидетельствует о 2D сильной локализации.

Представленная работа проведена при частичной поддержке НИЦ «Курчатовский институт» [2753 (характеризация)] и Российского Научного Фонда [гранты 19-19-00009 (транспорт) и 20-79-10028 (синтез)].

Литература

1. N.R. Glavin et al., *Advanced Materials*, **32**, 1904302 (2020).
2. O.E. Parfenov et al., *Materials Today*, **29**, 20-25 (2019).
3. D.V. Averyanov et al., *Nano Research*, **13**, 3396-3402 (2020).
4. O.E. Parfenov et al., *Advanced Functional Materials*, **30**, 1910643 (2020).
5. N.P. Ong et al., *Nature Review Physics*, **3**, 394–404 (2021).

ДВУМЕРНЫЙ ФЕРРОМАГНЕТИЗМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ФАЗ Eu НА ГЕРМАНИИ

**Д.В. Аверьянов¹, И.С. Соколов¹, И.А. Каратеев¹, А.Н. Талденков¹, О.А. Кондратьев¹,
А.М. Токмачёв¹, О.Е. Парфёнов¹, В.Г. Сторчак¹*

¹НИИЦ «Курчатовский институт»

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

TWO-DIMENSIONAL FERROMAGNETISM OF Eu SURFACE PHASES ON GERMANIUM

**D.V. Averyanov¹, I.S. Sokolov¹, I.A. Karateev¹, A.N. Taldenkov¹, O.A. Kondratev¹,
A.M. Tokmachev¹, O.E. Parfenov¹, V.G. Storchak¹*

¹National Research Centre «Kurchatov Institute»

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

2D magnetic materials [1] stand at the crossing of two key paths on the roadmap of modern electronic devices: miniaturization to increase the density of electronic components and the development of materials, demonstrating unique properties to expand the functionality. Such materials are rare, making discovery of new representatives all the more valuable.

Here, we report new systems of 2D magnets – surface phases (SPh) of Eu on Ge(001) and Ge(110). Their synthesis is carried out by MBE; structural investigations confirm the superb crystalline quality of these systems. The materials demonstrate rather strong ferromagnetic signals. The 2D character of their magnetism manifests itself by strong dependence of the effective transition temperature on weak magnetic fields. In accordance with the previously reported 2D magnetic character of Eu SPh on Si(001) [2], these results establish a new class of 2D magnets. The class can be further expanded by changing the substrate and/or the type of magnetic atoms.

Двумерные магнитные материалы [1] находятся на пересечении двух ключевых направлений, задающих дальнейшее развитие электронных устройств: миниатюризация для повышения плотности базовых элементов и использование материалов с новыми уникальными свойствами для расширения функциональности и задействования в их работе новых принципов. Двумерные магнитные материалы достаточно редки, что обуславливает актуальность поиска и исследования свойств таких материалов.

Недавно нашей научной группой были открыты новые двумерные материалы на основе Eu с толщиной в несколько атомных слоев [3-5], а также субмонослойные материалы – в виде поверхностных фаз (ПФ) Eu на Si(001) [2]. В данной работе рассматривается развитие последнего класса материалов – ПФ Eu на Ge(001) и Ge(110).

ПФ Eu на Ge формировались методом молекулярно-лучевой эпитаксии путем осаждения Eu на нагретую подложку, очищенную от есте-

ственного оксида. Для предотвращения деградации при выносе на атмосферу они покрывались защитным слоем Al.

Контроль процесса формирования ПФ осуществлялся с помощью дифракции быстрых электронов. По наблюдаемым дифракционным картинам были отработаны методики синтеза известных ПФ Eu на Ge(001) (2×3 , 1×8 и 1×3), обнаружены и идентифицированы две ПФ Eu на Ge(110) (из-за более сложной структуры обозначаемые через соотношение базисных векторов ПФ относительно базисных векторов нереконструированной поверхности Ge: $\mathbf{c}_1 = \mathbf{a}_1 + 3\mathbf{a}_2$, $\mathbf{c}_2 = 3\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2$ для первой ПФ и $\mathbf{c}_1 = 2\mathbf{a}_1 + 3\mathbf{a}_2$, $\mathbf{c}_2 = 2\mathbf{a}_1 - 3\mathbf{a}_2$ для второй ПФ).

Несмотря на предельно малую толщину, магнитные свойства рассматриваемых систем оказываются достаточно выражены для их исследования с помощью СКВИД-магнитометрии. Полученные температурные зависимости намагниченности демонстрируют повышение температуры перехода при приложении слабого магнитного поля, что является характерным признаком 2D ферромагнетизма. Установленный по полевым зависимостям намагниченности момент насыщения, приходящийся на атом Eu, оказался примерно в 2 раза меньше предельного значения $7 \mu_B/\text{Eu}$. Это свидетельствует о наличии конкурирующих магнитных взаимодействий. Тем не менее, магнитный момент значительно превышает величины, характерные для других двумерных ферромагнетиков на основе Eu.

Таким образом, магнитные свойства, демонстрируемые ПФ Eu на Ge(001) и Ge(110), наряду со свойствами ПФ Eu на Si(001), позволяют сделать вывод об открытии класса двумерных магнитных материалов. Интеграция данных материалов с промышленными полупроводниковыми платформами упрощает задачу их возможного использования в устройствах спинтроники. Значительное количество ПФ металлов предполагает возможность расширения открытого класса материалов путем замены магнитных атомов ПФ или подложки.

Работа выполнена при поддержке РНФ (20-79-10028), Министерства науки и высшего образования России (075-15-2021-1351) и НИЦ “Курчатовский институт” (2753). Работа Д.В. Аверьянова поддержана стипендией Президента РФ (СП-3111.2022.5).

Литература

1. B. Huang et al., Nat. Mater., **19**, 1276 (2020).
2. A.M. Tokmachev et al., ACS Nano, **15**, 12034 (2021).
3. A.M. Tokmachev et al., Nat. Commun., **9**, 1672 (2018).
4. A.M. Tokmachev et al., Mater. Horiz., **6**, 1488 (2019).
5. I.S. Sokolov et al., Mater. Horiz., **7**, 1372 (2020).

**ИНИЦИИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРЕЦЕССИИ
В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ EuO ПУТЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ
ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ СПИНОВ**

**Д.В. Аверьянов¹, И.С. Соколов¹, И.А. Каратеев¹, А.Н. Талденков¹, О.А. Кондратьев¹,
А.М. Токмачёв¹, О.Е. Парфёнов¹, В.Н. Катс², Л.А. Шелухин², П.А. Усачев², В.В. Павлов²,
В.Г. Сторчак¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт»

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

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, дом 26

**FEMTOSECOND OPTICAL ORIENTATION TRIGGERING MAGNETIZATION
PRECESSION IN EPITAXIAL EuO FILMS**

**D.V. Averyanov¹, I.S. Sokolov¹, I.A. Karateev¹, A.N. Taldenkov¹, O.A. Kondratev¹,
A.M. Tokmachev¹, O.E. Parfenov¹, V.N. Kats², L.A. Shelukhin², P.A. Usachev², V.V. Pavlov²,
V.G. Storchak¹*

¹National Research Centre «Kurchatov Institute»

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

²Ioffe Institute

Russia, 194021, St. Petersburg, Politekhnikeskaya, 26

Fast, technological and stable manipulation of magnetization is one of the key elements for a successful implementation of spintronic devices. In this regard spin orientation by an optical method has an advantage because it offers an ultrafast magnetization switching [1, 2].

Here, we report magneto-optical properties of EuO – a promising material for spintronic devices [3, 4] – based on pump-probe measurements using ultra-short laser pulses. The magnetization precession, observed for circularly polarized light excitation, reveals a laser-induced coherent FM response in the external magnetic field. Numerical estimates establish optical spin orientation by the electronic transition $4f^7 5d^0 \rightarrow 4f^6 5d^1$ as a mechanism triggering the collective magnetization precession. The results promise applications of EuO-based systems in optoelectronics and spintronics.

Возможность быстрого, устойчивого и технологически легко осуществимого управления магнитной степенью свободы является одной из ключевых задач для создания устройств спинтроники. Среди различных вариантов управления магнитной подсистемой оптические методы занимают одно из центральных мест, демонстрируя исключительно малые времена переключения намагниченности [1, 2].

В данной работе рассматриваются магнитооптические свойства материалов на основе EuO. Благодаря спиновому расщеплению зоны прово-

димости этот материал обладает практически 100 % спиновой поляризацией носителей и поэтому считается весьма перспективным для создания устройств спинтроники [3, 4].

В качестве объектов исследования выбраны две системы: полупроводниковый стехиометрический EuO и металлический EuO, легированный Gd. Исследуемые эпитаксиальные гетероструктуры EuO/YSZ и $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{O}/\text{YSZ}$ формировались методом молекулярно-лучевой эпитаксии путем осаждения Eu (и опционально Gd) в потоке молекулярного кислорода. Был использован режим дистилляции по Eu, обеспечивающий стехиометрию материалов [5].

Изучение магнитооптических свойств EuO проводилось методом накачки-зондирования с использованием сверхкоротких лазерных импульсов. Образцы EuO помещались в магнитное поле, приложенное параллельно поверхности образца. Температура образцов изменялась в диапазоне от 20 до 300 К. Время задержки пробного импульса варьировалось путем изменения оптической длины пути.

В ходе экспериментов были установлены зависимости величины магнитооптического эффекта Керра, пропорционального фотоиндуцированной намагниченности, от времени задержки при различных температурах. Полученные кривые имеют осциллирующую структуру, отражающую прецессию намагниченности. В обоих образцах осциллирующая составляющая менее выражена при уменьшении магнитного поля и при повышении температуры, полностью исчезая при переходе через температуру Кюри. Численные оценки наблюдаемых эффектов позволяют установить, что механизм, инициирующий прецессию намагниченности, состоит в оптической ориентации спинов при электронном переходе $4f^7 5d^0 \rightarrow 4f^6 5d^1$. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования EuO в оптоэлектронных и спинтронных устройствах.

Работа выполнена при поддержке РФФ (20-79-10028), Министерства науки и высшего образования России (075-15-2021-1351), НИЦ “Курчатовский институт” (2753), а также РФФИ и ННИО (19-52-12063 / TRR160-C8). Работа Д.В. Аверьянова поддержана стипендией Президента РФ (СП-3111.2022.5).

Литература

1. A.V. Kimel et al., Phys. Rep., **852**, 1 (2020).
2. A. El-Ghazaly et al., J. Magn. Magn. Mater., **502**, 166478 (2020).
3. A. Schmehl et al., Nat. Mater., **6**, 882 (2007).
4. D.V. Averyanov et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, **7**, 6146 (2015).
5. D.V. Averyanov et al., Nanotechnology, **29**, 195706 (2018).

**СПИНОВОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ В КВАЗИДВУМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ
НА ОСНОВЕ CdS, CdSe, CdTe И GaAs**

****А.И. Лебедев***

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, e-mail: swan@scon155.phys.msu.ru

**SPIN SPLITTING IN QUASI-TWO-DIMENSIONAL STRUCTURES
BASED ON CdS, CdSe, CdTe, AND GaAs**

****A.I. Lebedev***

M.V. Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1, e-mail: swan@scon155.phys.msu.ru

The linear and cubic spin splitting coefficients for quasi-two-dimensional superlattices, nanoplatelets, and nanoheterostructures based on CdS, CdSe, and CdTe cadmium chalcogenides calculated from first principles taking into account all spin effects using the ABINIT program are compared with spin splitting coefficients for bulk semiconductors with the zinc blende structure. Bulk GaAs and GaAs/AlAs superlattices are also studied for comparison. It is shown that spin splitting effects in quasi-two-dimensional structures, especially nanoheterostructures, are significantly stronger in comparison with bulk compounds.

Вопрос о спиновом расщеплении подзон, возникающем в результате спин-орбитального взаимодействия в кристаллах без центра инверсии даже в отсутствие внешнего магнитного поля, в настоящее время является особенно актуальным в связи с активным изучением спиновых эффектов в полупроводниках и использованием их в новой области электроники – спинтронике. Эти явления уже находят применение при создании новых типов запоминающих устройств (STT-MRAM, SOT-MRAM), спиновых транзисторов и логических элементов, источников терагерцового излучения. Благодаря большим временам спиновой релаксации эти эффекты могут быть использованы при создании квантовых компьютеров. Понижение симметрии при переходе от объемных образцов к квазидвумерным структурам позволяет ожидать усиления этих эффектов [1].

Целью настоящей работы являлся расчет из первых принципов методом функционала плотности величин спинового расщепления в квазидвумерных структурах – сверхрешетках, нанопластинках и наногетероструктурах на основе халькогенидов кадмия и их сравнение с величинами спинового расщепления в объемных полупроводниках со структурой шпинелита. С целью сравнения величин эффектов расчеты были также проведены для объемного GaAs и сверхрешеток GaAs/AlAs. Все расчеты с пол-

ным учетом спиновых эффектов проводились с использованием программы ABINIT.

Симметричный анализ показывает, что спиновое расщепление в кубических кристаллах анизотропно и должно наблюдаться во всех указанных выше системах, причем величина расщепления как функция волнового вектора k должна меняться $\sim k^3$ для зон симметрии Γ_6 и Γ_7 и $\sim k$ для зоны симметрии Γ_8 . В квазидвумерных структурах благодаря понижению симметрии спиновое расщепление становится изотропным в плоскости и $\sim k$ для всех зон симметрии Γ_6 и Γ_7 .

Расчетные коэффициенты, отвечающие линейному и кубическому слагаемым в расщеплении в направлении $k \parallel [110]$, в ряду объемных кристаллов CdS–CdSe–CdTe систематически изменяются от 0.125 до 0.088 $\text{eV} \cdot \text{\AA}$ для валентной зоны и от 2 до 53 $\text{eV} \cdot \text{\AA}^3$ для зоны проводимости. Для GaAs эти коэффициенты равны 0.014 $\text{eV} \cdot \text{\AA}$ и 48 $\text{eV} \cdot \text{\AA}^3$.

Расчеты, проведенные для сверхрешеток CdSe/CdS, CdSe/CdTe и GaAs/AlAs, находят значения линейного и кубического слагаемых, близкие к полученным выше для объемных полупроводников, однако их суммарный эффект в спиновом расщеплении оказывается в несколько раз больше.

Расчеты, выполненные для нанопластинок CdSe толщиной от 3 до 8 монослоев, показывают умеренные значения линейного и кубического коэффициентов (0.070÷0.081 $\text{eV} \cdot \text{\AA}$, 6.5÷9.2 $\text{eV} \cdot \text{\AA}^3$), однако их суммарный эффект оказывается одним из самых высоких (более 30 meV). Наконец, расчеты для нанопластинок двухсторонних наногетероструктур CdSe/CdS типа ядро/оболочка с полной толщиной до 12 монослоев находят самые высокие значения величин суммарного спинового расщепления. В аналогичных наногетероструктурах CdSe/CdTe величины спинового расщепления оказываются примерно вдвое меньше.

Полученные результаты показывают, что спиновое расщепление в квазидвумерных наноструктурах и особенно наногетероструктурах действительно оказывается заметно сильнее, чем в объемных кристаллах.

Литература

1. J.-W. Luo, A.N. Chantis, M. van Schilfgaarde et al., Phys. Rev. Lett., **104**, 066405 (2010).

**ВОЗМОЖНОСТЬ УСИЛЕНИЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ SrTiO_3 В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПУТЕМ
ЕГО ЛЕГИРОВАНИЯ НЕЦЕНТРАЛЬНЫМИ АТОМАМИ Fe**

****И.А. Слущинская, А.И. Лебедев***

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, e-mail: irinasluch@gmail.com

**POSSIBILITY OF INCREASING THE TUNABILITY OF DIELECTRIC CONSTANT
OF SrTiO_3 IN AN ELECTRIC FIELD BY ITS DOPING WITH OFF-CENTER
Fe ATOMS**

****I.A. Sluchinskaya, A.I. Lebedev***

M.V. Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1, e-mail: irinasluch@gmail.com

The local environment of the iron impurity in SrTiO_3 is studied by X-ray and XAFS spectroscopy. The influence of annealing temperature and deviation from stoichiometry on the Fe incorporation into the *A* and *B* sites of the perovskite structure is investigated. The obtained results show that at high synthesis temperature the Fe atoms partially (up to 30 %) enter the *A* sites in SrTiO_3 and become off-center. These off-center atoms have switchable dipole moments, which can increase the dielectric constant. The obtained results agree with results of first-principles calculations, according to which the Fe impurity at the *A* site exhibits a strong off-centering.

В настоящее время наиболее перспективными сегнетоэлектриками-мультиферроиками для таких СВЧ применений как перестраиваемые фильтры, фазовращатели и линии задержки в фазированных антенных решетках считаются твердые растворы на основе SrTiO_3 . Легирование этих материалов магнитными *3d* примесями улучшает их характеристики и, в частности, увеличивает степень перестройки диэлектрической проницаемости в электрическом поле [1].

Целью настоящей работы являлось исследование возможности получения SrTiO_3 с мультиферроидными свойствами за счет его легирования нецентральными магнитными примесями Fe^{2+} в узле *A*. Дипольные моменты таких примесей должны способствовать дальнейшему увеличению диэлектрической проницаемости SrTiO_3 . До сих пор считалось, что железо замещает атомы Ti в узле *B*, а возможность его введения в узел *A* практически не рассматривалась.

Образцы SrTiO_3 , легированные 2÷3 % Fe, с различным отклонением от стехиометрии получались методом твердофазного синтеза. Для преимущественного введения примесей в узлы *A* или *B* структуры перовскита

состав образцов преднамеренно отклонялся от стехиометрии соответственно в сторону избытка Ti или Sr. Рентгеновские спектры поглощения записывались путем регистрации рентгеновской флуоресценции на K -крае поглощения Fe при 300 К на станции КМС-2 источника синхротронного излучения BESSY. Обработка EXAFS спектров осуществлялась с помощью пакета программ IFEFFIT.

Свойства различных примесных центров Fe рассчитывались из первых принципов с использованием программы ABINIT в приближении LDA+ U на 80-атомных кубических сверхъядерках. Для описания атомов Fe с частично заполненной d -оболочкой использовались псевдопотенциалы PAW.

Расчеты показали, что в SrTiO_3 положение примесных ионов Fe^{2+} в узле A является неустойчивым. Во всех трех конфигурациях с нецентральной смещением вдоль направлений $[100]$, $[110]$ и $[111]$ ион железа находится в высокоспиновом состоянии. Найденная геометрия указанных структур, а также ряда структур, включающих кроме железа вакансии кислорода, использовалась в качестве структурных моделей при обработке экспериментальных спектров EXAFS.

По рентгеновским данным все образцы SrTiO_3 , легированные Fe, имеют кубическую структуру перовскита при 300 К.

Результаты обработки экспериментальных спектров XANES и EXAFS образцов $\text{SrTiO}_3(\text{Fe})$ и их подгонки с использованием разных теоретических моделей показали, что для образцов, отожженных при 1500 °C, наилучшее согласие экспериментальных и расчетных кривых достигается при использовании модели, допускающей одновременное вхождение примесных атомов Fe в узлы A и B структуры перовскита. При моделировании спектров EXAFS и их сравнении с экспериментом было обнаружено, что атомы Fe испытывают нецентральное смещение на ~ 1 Å вдоль оси $[100]$. Найденные в эксперименте межатомные расстояния согласуются с результатами расчетов из первых принципов. Доля примесных атомов в узле A увеличивалась от ~ 0.24 в образце с номинальным составом $\text{SrTi}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}\text{O}_3$, до ~ 0.31 в образце с номинальным составом $\text{Sr}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{TiO}_3$ [2]. В образцах, отожженных при 1100 °C, атомы Fe находятся в узле B . Таким образом, при определенных условиях синтеза примесь Fe в SrTiO_3 может входить в узлы A и создавать там переориентируемые дипольные моменты.

Литература

1. Y. Ye, T. Guo, *Ceram. Int.*, **35**, 2761 (2009).
2. И.А. Слущинская, А.И. Лебедев, *Физ. тверд. тела*, **64**, 345 (2022).

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ГРАФЕНА, ОСАЖДЕННОГО
НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПОДЛОЖКУ ИЗ ДИТЕЛЛУРИДА МОЛИБДЕНА**

***П.А. Кулямин**

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
Россия, 19991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, e-mail: kulyamin.pavel@gmail.com

**ELECTRONIC PROPERTIES OF GRAPHENE DEPOSITED
ON A DIELECTRIC SUBSTRATE FROM MOLYBDENUM DITELLURIDE**

***P.A. Kulyamin**

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 19991 GSP-1 Moscow, Vavilov street 38, e-mail: kulyamin.pavel@gmail.com

Graphene has great potential as a material for the production of logic and high-speed switching devices, due to the phenomenal mobility of charge carriers. The creation of composite heterostructures based on graphene can not only open the forbidden zone, but also provides an easy way to adjust the electronic properties of the material using an electric field. The density functional theory with generalized gradient approximation (GGA) in the Purdue-Burke–Ernserhof (PBE) parametrization with vdW correction was used to calculate the electronic properties. As a result, the structure of a two-layer material consisting of graphene and molybdenum ditelluride was modeled and its electronic properties were calculated. The results obtained indicate the possibility of practical application of such material as a basis for the production of logic and high-speed switching devices, such as field-effect transistors.

Такой материал как графен вызывает огромный интерес у научного сообщества с момента его экспериментальной реализации в 2004 году [1], благодаря ряду уникальных свойств: аномально высокая подвижность носителей заряда, механическая прочность. Графен является бесщелевым полупроводником с линейным законом дисперсии носителей заряда вблизи уровня Ферми, это означает, что у этого материала отсутствует запрещенная зона, что является серьезным препятствием для использования графена в логических и высокоскоростных коммутационных устройствах, таких как полевые транзисторы или устройства спинтроники.

В частности, одним из способов создания запрещенной зоны в графене – это создание на его основе сложных композитных структур, что также обеспечивает простой способ настройки электронных свойств такого материала с помощью внешнего электрического поля [2].

Настоящее исследование направлено на изучение электронных свойств графена на подложке из дителлурида молибдена. Данный материал обладает двумерной кристаллической решеткой аналогичной графену, что позволяет легко расположить его под графеном.

Расчеты проводились в программном пакете QuantumEspresso [3]. Была использована теория функционала плотности с обобщенной градиентной аппроксимацией (GGA) в параметризации Пердью–Берка–Эрнзерхофа (PBE) из-за отсутствия сильных связующих взаимодействий между графеном и подложками ожидается, что слабые Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия будут вносить не малый вклад в результирующий расчет. Поскольку стандартный функционал PBE не может хорошо описать слабые взаимодействия, мы приняли коррекцию vdW (DFT-D3).

В результате работы были рассчитаны такие электронные характеристики графена на подложке из дителлурида молибдена, как плотность электронных состояний и зонная структура. Также была измерена ширина полученной запрещенной зоны и исследовано влияние на эту величину продольной деформации. Плотность электронных состояний и зонная структура для сжатой на 8% структуры представлена на рис. 1.

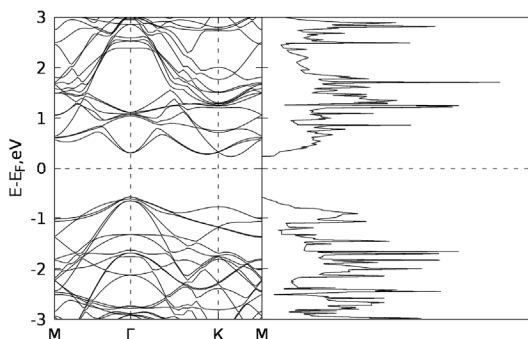


Рис. 1. Зонная структура и плотность электронных состояний Te_2Mo на подложке из графена с уменьшенной на 8% элементарной ячейкой

Максимальный размер диэлектрической щели был получен при сжатии на 8% и достигает 0.8 eV.

Литература

1. K.S. Novoselov et al. (2004).
2. Ya. Ma et. al. (2012).
3. P. Giannozzi et al., J. Phys.: Condens. Matter., 29, 465901 (2017).

**ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ БОРОФЕН-ГРАФЕН:
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ,
ПУТИ СТАБИЛИЗАЦИИ**

****А.И. Кочаев^{1,2}, К.П. Катин^{1,3}, М.М. Маслов^{1,3}***

¹Научно-исследовательский институт Проблем развития
научно-образовательного потенциала молодежи

Россия, 119620, г. Москва, ул. Авиаторов, дом 14/55, e-mail: a.kochaev@gmail.com

²Ульяновский государственный университет

Россия, 432017, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, дом 42, e-mail: a.kochaev@ulsu.ru

³Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

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

**POINT DEFECTS IN BOROPHENE-GRAPHENE HETEROSTRUCTURE: MODULING,
ENERGY CHARACTERISTICS, WAYS OF STABILIZATION**

****А.И. Кочаев^{1,2}, К.П. Катин^{1,3}, М.М. Маслов^{1,3}***

¹Research Institute for the Development of Scientific and Educational Potential of Youth
Russia, 119620 Moscow, Aviatorov str. 14/55, e-mail: a.kochaev@gmail.com

²Ulyanovsk State University

Russia, 432017 Ulyanovsk, Leo Tolstoy str. 42, e-mail: a.kochaev@ulsu.ru

³National Research Nuclear University “MEPhI”

Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe sh. 31, e-mail: mike.maslov@gmail.com

At present, there has been a clear shift in the study of the properties of two-dimensional materials, characterized by a transition from pure defect-free crystals towards the study of crystals with point and extended distortions. The emergence of new vertical heterostructures re-poses the problem of studying the energy characteristics of point defects. It is shown that there are three nonequivalent vacancy defects containing the minimum number of removed atoms. The application of the optimization procedure indicates that the atomic rearrangements near the vacancy are much larger than in the case of single-layer materials.

В настоящее время наметился отчетливый сдвиг в исследованиях свойств двумерных материалов, характеризующийся переходом от чистых бездефектных материалов в сторону изучения материалов с точечными и протяженными искажениями. Наиболее распространенным дефектом структуры двумерных материалов является моновакансионный дефект. Величины энергий образования моновакансий большинства двумерных материалов уже известны. Для графена, например, она составляет 7.5 эВ.

Появление новых вертикальных гетероструктур, образованных из однослойных материалов, в общем случае, различной симметрии и химического состава, заново ставит задачу исследования энергетических харак-

теристик точечных дефектов. Кроме того, данная задача может усложняться тем обстоятельством, что однослойные материалы «в сборе» могут удерживаться посредством ковалентных, либо Ван-дер-Ваальсовых сил. В настоящей работе исследованы сквозные точечные дефекты двуслойной борофен-графеновой гетероструктуры, составленной из полоскового борофена и графена. На ее примере показано, что сквозных неэквивалентных вакансий с удалением минимального количества атомов может быть три. Вакансия первого типа обусловлена удалением пары атомов бор–углерод, связанных ковалентной связью и находящихся друг под другом. Вакансия второго типа также обусловлена удалением двух атомов, но в данном случае, неудерживаемых ковалентными связями. И вакансия третьего типа – моновакансия атома бора (в центре гексагона), не имеющего связи ни с одним атомом углерода. Атомные конфигурации дефектного борофен-графена с изображением всех трех типов рассматриваемых вакансий изображены на рис. 1. На рисунке слева направо приведены конфигурации вблизи вакансионных дефектов, полученные после решения оптимизационной задачи.



Рис. 1. Атомные структуры борофен-графена с вакансией первого (слева), второго (по середине) и третьего типов (справа)

вблизи удаляемых атомов. В области пространства, где были удалены нековалентно-связанные атомы бора и углерода, в ходе оптимизации, образовался кластер из атомов бора. Чтобы предотвратить заполнение сквозной вакансии, предлагается пассивировать ее края подходящими атомами. Как показали, вычисления энергии формирования, образование вакансии третьего типа наиболее выгодно с точки зрения сохранения энергетической устойчивости.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-73-00009).

Из рисунка следует, что удаление пары атомов бор–углерод, не имеющих ковалентной связи и соответствующей вакансии второго типа приводит к существенной перестройке атомов

**ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ В ТВЕРДОМ АТОМАРНОМ ВОДОРОДЕ
ПОД ДАВЛЕНИЕМ (DFT МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

****К.С. Гришаков, Н.Н. Дегтяренко***

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

POINT DEFECTS IN SOLID ATOMIC HYDROGEN UNDER PRESSURE (DFT STUDY)

****K.S. Grishakov, N.N. Degtyarenko***

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: ksgrishakov@mephi.ru

The stability of solid atomic hydrogen with the $I4_1/amd$ crystal structure to the formation of point defects, such as vacancy, interstitial, and double vacancy, is investigated within the framework of the density functional theory. It is shown that at a pressure below 265 GPa, the equilibrium concentration of vacancies reaches a critical value ($\sim 10\%$) even at temperatures of the order of helium. Thus, the destruction of the metastable atomic state occurs at higher pressures than predicted by calculations of phonon spectra. It is shown that the use of atomic hydrogen at room temperature requires pressures exceeding 280 GPa. The issues of mechanical stability of the $I4_1/amd$ atomic phase in the pressure range of 250÷600 GPa are investigated. It is shown that there are regions of instability of the atomic phase of hydrogen in which there is a transition between two different configurations of the structure with symmetry $I4_1/amd$ through the phase with symmetry $FDDD$.

В 1935 году было предсказано, что при достаточном давлении твердый молекулярный водород будет трансформироваться в металлическую атомарную фазу (металлический водород) [1], которая может быть сверхпроводником с очень высокой критической температурой [2]. С тех пор проводятся активные экспериментальные и теоретические исследования, направленные на поиск новых фаз водорода при высоком давлении и возможности металлизации твердого водорода.

В качестве атомарной металлической фазы водорода теоретически предсказываются кристаллические структуры $I4_1/amd$ [3] и орторомбическая структура $FDDD$ [4]. Стоит отметить, что эти структуры энергетически и структурно очень близки между собой, и структура $FDDD$ может создаваться сдвиговым искажением $I4_1/amd$ [4]. Расчеты в рамках теории функционала плотности предсказывают, что переход в атомарное состояние из молекулярного будет происходить при давлениях порядка 500 ГПа

[3]. В связи с этим, для практических применений важным является вопрос метастабильности металлического водорода при более низких давлениях.

Возможность метастабильности твердой атомарной фазы металлического водорода $I4_1/amd$ детально исследовалась в рамках теории функционала плотности в работах [5, 6]. На основе расчетов фононных спектров при нулевой температуре делается важный вывод о том, что ниже давления порядка 200 ГПа металлический водород не имеет области метастабильности. Несмотря на полученные результаты, остается открытым вопрос о возможности распада метастабильного атомарного водорода $I4_1/amd$ за счет различных возмущений, таких как температура, поверхность и структурные дефекты.

В настоящей работе подробно исследованы вопросы механической устойчивости атомарного водорода в широком диапазоне давлений. В диапазоне давлений 250÷600 ГПа продемонстрировано наличие 3 областей механической неустойчивости фазы $I4_1/amd$. Причем размер областей неустойчивости увеличивается с ростом давления. Причина такого поведения атомарного водорода $I4_1/amd$ заключается в существование нескольких структурных минимумов этой фазы, переход между которыми происходит в определенных диапазонах давлений с искажением кристаллической ячейки до симметрии $FDDD$ [7].

Рассмотрена возможность разрушения метастабильного состояния твердого атомарного водорода дефектами кристаллической решетки, такими как одиночная вакансия, двойная вакансия, междоузельный атом. Определены характерные особенности зависимости энтальпии формирования дефектов от давления. Показано, что термодинамически равновесные вакансии могут играть важную роль в разрушении метастабильного состояния атомарного водорода, поскольку неустойчивость по отношению к росту дефектности фазы $I4_1/amd$ при понижении давления возникает в области давления, порядка 265 ГПа.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания №0723-2020-0036).

Литература

1. E. Wigner, H.B. Huntington, The Journal of Chemical Physics. **3**, 764 (1935).
2. N.W. Ashcroft, Phys. Rev. Lett. **21**, 1748 (1968).
3. J.M. McMahon, D.M. Ceperley, Phys. Rev. Lett. **106**, 165302 (2011).
4. H.Y. Geng, H.X. Song, J.F. Li, Q. Wu, J. Applied Physics **111**, 063510 (2012).
5. C.M. Tenney, K.L. Sharkey, J.M. McMahon, Phys. Rev. B. **102**, 224108 (2020).
6. N.N. Degtyarenko, K.S. Grishakov, J. Phys.: Conf. Ser. **1686**, 012042 (2020).
7. K.S. Grishakov, N.N. Degtyarenko, Phys. Lett. A **425**, 127876 (2022).

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГЕРМАНИЕВЫХ ПРИЗМАНОВ**

В.Б. Меринов, К.П. Катин, М.М. Маслов

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

ENERGY AND ELECTRONIC CHARACTERISTICS OF GERMANIUM PRISMANES

V.B. Merinov, K.P. Katin, M.M. Maslov

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

The energy and electronic characteristics of germanium prismanes with indices $[n, m]$, where $n = 2 \div 8$ is the number of rings in the structure, and $m = 5 \div 8$ is the number of atoms in the ring, have been studied using the density functional theory with the hybrid B3LYP functional and the 6-31G(d) basis set. It was found that the system reduces the thermodynamic stability and HOMO-LUMO gap with an increasing the prismane effective length and decreasing the diameter.

В последнее время исследование углеродных наноструктур сопровождается обнаружением ряда функциональных свойств, которые находят применение в той или иной области. Вместе с тем, возникает вопрос о физико-химических характеристиках структурно схожих с углеродными объектами, построенных из атомов другого сорта. Так, например, в настоящее время известно, что благодаря псевдо-эффекту Яна-Теллера теоретически возможны кремниевые и германиевые нанотрубки особого типа, называемые призмами [1]. Основание призмы имеет вид многоугольника, в вершинах которого располагаются атомы. Совокупность этих колец, уложенных слой за слоем, составляет нанотрубку. Например, с анализом силапризм (кремниевых призм) можно ознакомиться в работе [2].

В настоящей работе с помощью компьютерного моделирования предсказаны энергетические и электронные характеристики германиевых призм с пассивацией краев атомами водорода. Представленное исследование охватывает призманы, характеризующиеся индексами $[n, m]$, где $n = 2 \div 8$ число колец в структуре, а $m = 5 \div 8$ число атомов в кольце. Расчет энергетических и электронных характеристик проводился на уровне теории DFT/B3LYP/6-31G(d). Анализ полученных данных сопровождался расчетом энергии связи E_b и энергией когезии германиевого каркаса E_{sk} . Энергия связи вычислялась по следующей формуле:

$$E_b \left[\frac{\text{эВ}}{\text{атом}} \right] = \frac{1}{N_{at}} \left[xE(\text{Ge}) + yE(\text{H}) - E_{tot}(\text{Ge}_x\text{H}_y) \right],$$

где $E_{tot}(\text{Ge}_x\text{H}_y)$ – полная энергия призмана, состоящего из x атомов германия и y атомов водорода, а $E(\text{Ge})$ и $E(\text{H})$ энергия изолированных атомов германия и водорода соответственно. Энергия когезии определяется следующим образом:

$$E_{sk} \left[\frac{\text{эВ}}{\text{атом}} \right] = \frac{1}{x} \left[N_{at} E_b(\text{Ge}_x\text{H}_y) + \mu_{\text{H}} y \right],$$

где $\mu_{\text{H}} = -3.27$ эВ/атом – химический потенциал водорода. Полученные результаты представлены на рисунке ниже.

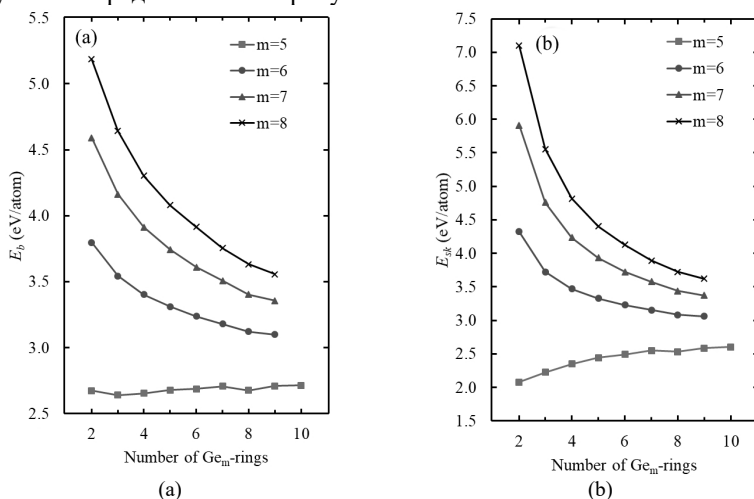


Рис. 1. Энергия связи E_b (a) и энергия когезии E_{sk} (b) германиевых призматов

В результате работы можно сделать вывод, что с увеличением длины нанотрубки уменьшается ее термодинамическая устойчивость. Анализ НОМО-LUMO щели наблюдаемых структур с ростом длины показывает быстрый переход из диэлектрической в полупроводниковую область. При этом дальнейшее увеличение эффективной длины призмана не исключает его переход в металлическое состояние.

Литература

1. E. Perim et al., Phys. Chem. Chem. Phys., **16**, 24570 (2014).
2. K.P. Katin et al., Comput. Mater. Sci., **174**, 109480 (2020).

**СТРУКТУРНЫЕ, ЭЛЕКТРОННЫЕ И АДсорбЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ФТОРИРОВАННЫХ ФУЛЛЕРЕНОВ**

*Е.Б. Калика¹, *К.П. Катин^{1,2}, М.М. Маслов^{1,2}*

¹НИИ Проблем развития научно-образовательного потенциала молодёжи
Россия, 119620, г. Москва, Авиаторов ул., дом 14/55, e-mail: KPKatin@yandex.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: Mike.Maslov@gmail.com

**STRUCTURAL, ELECTRONIC AND ADSORPTION PROPERTIES
OF FLUORINATED FULLERENES**

*E.B. Kalika¹, *K.P. Katin^{1,2}, M.M. Maslov^{1,2}*

¹Research Institute for the Development of Scientific and Educational Potential of Youth
Russia, 119620 Moscow, Aviatorov Str. 14/55, e-mail: KPKatin@yandex.ru

²National Research Nuclear University "MEPhI"
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe Shosse 31, e-mail: Mike.Maslov@gmail.com

Fluorinated fullerenes play an important role for many practical applications. However, complete fluorination of fullerenes is unattainable even under aggressive conditions. Here we combined the theory of the electron density functional and a genetic algorithm to search for low-energy isomers of partially fluorinated fullerenes. As a result, low-energy isomers of partially fluorinated fullerenes C₆₀ and C₇₀ were found and the corresponding quantum descriptors of reactivity were calculated. In particular, we defined ionization energy, electron affinity, electrophilicity index, chemical hardness and energies of frontier molecular orbitals for all considered compounds.

Несмотря на многообразие семейства фуллеренов, C₆₀ и C₇₀ остаются самыми распространенными и часто используемыми среди них. Функциональные группы меняют многие физико-химические характеристики фуллерена, в том числе оптические спектры, растворимость, электрофильность, биологическую активность и адсорбционную способность. В частности, фторированные фуллерены интересны с точки зрения конструирования носителей для доставки лекарств. Использование фтора обеспечивает несколько преимуществ. Во-первых, за счет электроотрицательности фтор обеспечивает неравномерное распределение заряда, что способствует адсорбции лекарств. Во-вторых, фторированный фуллерен может менять форму за счет поворота связей C-F, «подстраиваясь» под конкретное лекарство. В-третьих, связи C-F обладают активностью в ближнем ИК диапазоне, что позволяет нагревать систему и инициировать высвобождение лекарства при помощи облучения. Фторированные фуллерены по-

дробно рассматривались в качестве носителей лекарств в наших недавних работах [1–2].

Настоящее исследование направлено на поиск низкоэнергетических изомеров частично фторированных фуллеренов C_{60} и C_{70} . Полное фторирование фуллеренов энергетически невыгодно и как правило не осуществимо даже при агрессивных условиях (высокие температуры, давление и концентрация фтора, продолжительное время фторирования). После частичного фторирования поверхность фуллерена искривляется, на ней появляются вогнутые участки. Это препятствует дальнейшему фторированию, поэтому доля атомов углерода, на которые осаждается фтор, колеблется в диапазоне 3–80 % и не достигает 100 %. Комбинаторное число возможных изомеров, отличающихся друг от друга взаимным расположением атомов фтора, очень велико.

Для определения структуры низкоэнергетических изомеров, которые в основном будут получаться в экспериментах, мы использовали два взаимодополняющих подхода. Первый подход основан на предварительном определении предпочтительного расположения двух атомов фтора на поверхности фуллерена и дальнейшее конструирование фторированного фуллерена в приближении парного взаимодействия атомов на поверхности. Второй подход использовал разработанный нами генетический алгоритм, примененный для глобальной оптимизации фторированных фуллеренов. Начальная «популяция» изомеров выбиралась с учетом предпочтительных парных расположений атомов фтора на поверхности фуллерена (как известно, это орто и пара положения). Учет заранее рассчитанных парных взаимодействий позволил отсеивать заведомо энергетически невыгодные конфигурации, что существенно ускорило работу алгоритма.

В результате работы были найдены низкоэнергетические изомеры частично фторированных фуллеренов C_{60} и C_{70} и рассчитаны соответствующие квантовые дескрипторы реактивности – энергии ионизации, сродство к электрону, индекс электрофильности, химическая жесткость и энергии граничных молекулярных орбиталей. Полученные изомеры можно использовать для реалистичного моделирования фторированных фуллеренов. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-73-00245).

Литература

1. E.B. Kalika et al., J. Mol. Liquids, **353**, 118773 (2022).
2. K.P. Katin et al., Int. J. Mol. Sci., **23**, 2345 (2022).

ТЕРМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ГРАФИНА-6,6,12

Е.С. Долина, М.М. Маслов, К.П. Катин

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

THERMAL STABILITY OF THE 6,6,12-GRAPHYNE

E.S. Dolina, M.M. Maslov, K.P. Katin

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

Thermal stability of the 6,6,12-graphyne and its oligomers called radiaa-nulenes have been studied over the wide temperature range $T = 2900 \div 3900$ K using tight-binding molecular dynamics simulations. It was found that 6,6,12-graphyne (in the case of its synthesis) will show high kinetic stability. Its life-time at room temperature will reach $\sim 10^{31}$ s.

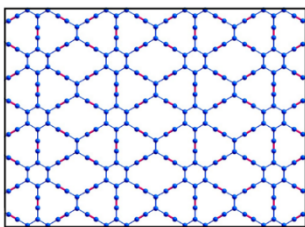


Рис. 1. Структура графина-6,6,12

После открытия графена было открыто множество других двумерных материалов, в том числе графон, графан, фаграфен, графин и т.д., которые представляют интерес из-за их уникальных структур, а также механических, оптических и электронных свойств. Графин представляет собой двумерный плоский углеродный аллотроп, состоящий из sp и sp^2 -связанных атомов углерода. Графин существенно отличается по своей структуре и свойствам от других аллотропных модификаций углерода. Графин-6,6,12 один из основных типов графина. Его структура изображена на рис. 1. В недавней работе [1] были исследованы структурные, колебательные, электронные и оптические свойства 6,6,12-графиновых олигомеров и их потенциальные области применения.

Основной целью данной работы было изучение термической стабильности 6,6,12-графина и сравнение результатов с аналогичными расчетами для 6,6,12-графиновых олигомеров и с ранее полученными данными для графена и других аллотропов углерода. Оценка их кинетической стабильности проводилась с помощью молекулярно-динамического моделирования с использованием неортогональной модели сильной связи (NTBM) [2]. Для определения температурной зависимости времени жизни

структуры, расчеты проводились в широком диапазоне температур $T = 2900 \div 3900$ К, результаты приведены на рис. 2.

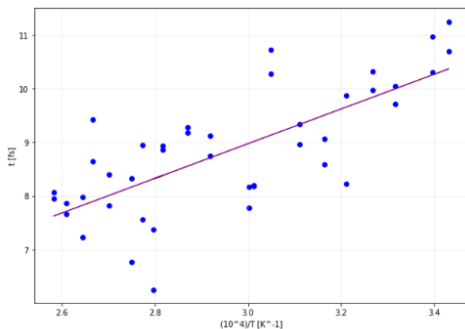


Рис. 2. Время жизни графина-6,6,12 до его распада в зависимости от обратной начальной температуры T^{-1}

Энергия активации E_a и частотный фактор A для процесса разложения были определены из зависимости времени жизни системы от температуры с использованием формулы Аррениуса:

$$\tau(T) = \frac{1}{A} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right),$$

где k_B — постоянная Больцмана.

Установлено, что значения энергии активации и частотного фактора и их стандартные отклонения для графина-6,6,12 составляют $E_a = 2.79 \pm \pm 0.2$ эВ и $A = 10^{15.3 \pm 0.5} \text{ с}^{-1}$, соответственно. По формуле Аррениуса можно определить время жизни исследуемых структур при разных температурах. Так при комнатной температуре (300 К) и при типичных температурах нефтехимических реакций $T \sim 800$ К время жизни 6,6,12-графина будет составлять $\tau_{6,6,12\text{-графин}}(300) \sim 10^{31} \text{ с}$ и $\tau_{6,6,12\text{-графин}}(800) \sim 10^2 \text{ с}$, соответственно.

Также были посчитаны рамановские спектры для графина-6,6,12 и для наименьшего из синтезированных олигомеров графина-6,6,12 [1].

В результате работы можно сделать вывод, что графин-6,6,12 (в случае его успешной синтеза) покажет высокую кинетическую стабильность, превосходящую другие двумерные аллотропы углерода. Полученные результаты служат важным ориентиром для потенциального применения графина-6,6,12.

Литература

1. S. Nath et al., J. of Phys. and Chem. of Solids, **153**, 109990 (2021).
2. M.M. Maslov, A.I. Podlivaev, K.P. Katin, Molecular Simulation, **42**(4), 305-311 (2016).

**InGaAlAs/InAlAs/InP ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО
МОДУЛЯТОРА НА 1.55 МКМ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЦИФРОВОЙ ЭПИТАКСИЕЙ**

**Д.В. Гуляев, Д.А. Колосовский, Д.В. Дмитриев, Е.А. Колосовский, К.С. Журавлев*

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

**HETEROSTRUCTURES InGaAlAs/InAlAs/InP FOR 1.55 MKM ELECTROOPTICAL
MODULATOR GROWN BY DIGITAL EPITAXY**

**D.V. Gulyaev, D.A. Kolosovsky, D.V. Dmitriev, E.A. Kolosovsky, K.S. Zhuravlev*

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

The structure and optical properties of heterostructures with InGaAlAs/InAlAs quantum wells in which a quaternary alloy is obtained by successive monolayer growth of InAlAs and InGaAs layers by digital molecular beam epitaxy are investigated. It is shown that such a method is promising for creating compact electrooptical modulators at a wavelength of 1.55 microns with allowable optical losses.

В данной работе мы изучили гетероструктуры с InAlGaAs/InAlAs квантовыми ямами, полученные методом цифровой молекулярно-лучевой эпитаксии и продемонстрировали их применимость для создания электрооптического модулятора (ЭОМ) на длину волны 1.55 мкм. В исследованных гетероструктурах однородный InGaAlAs четвертной раствор был заменен попеременным монослойным осаждением InAlAs и InGaAs слоев, что обеспечило нам хорошую воспроизводимость и стабильность задаваемого состава.

Методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в режиме поперечного сечения показано, что перемешивания тройных растворов InGaAs и InAlAs до однородного InGaAlAs четверного раствора не наблюдается даже при использовании слоев InAlAs толщиной в 2 монослоя, т.е. выращенная InGaAlAs квантовая яма сама представляет собой короткопериодную сверхрешетку. Ширина полосы фотолюминесценции такой гетероструктуры не превышает 20 мэВ, что соответствует флуктуациям состава в 1–2 %. Для цифровой InGaAlAs/InAlAs квантовой ямы проведен расчет энергетической структуры и волновых функций носителей заряда (см. рис 1А).

Для исследования оптических потерь на длине волны 1.55 мкм были изготовлены тестовые *pin* образцы, содержащие множественные InGaAlAs/InAlAs квантовые ямы различного состава и толщины слоев. Проведено измерение зависимостей коэффициента отражения образцов от напряжения электрического поля на рабочей длине модулятора 1.55 мкм. Показано, что при типичном полуволновом напряжении ЭОМ на основе InGaAlAs/InAlAs гетероструктуры в 2 Вольта изменение коэффициента поглощения не превышает 5 см^{-1} , что сопоставимо с литературными данными о потерях в ЭОМ [1].

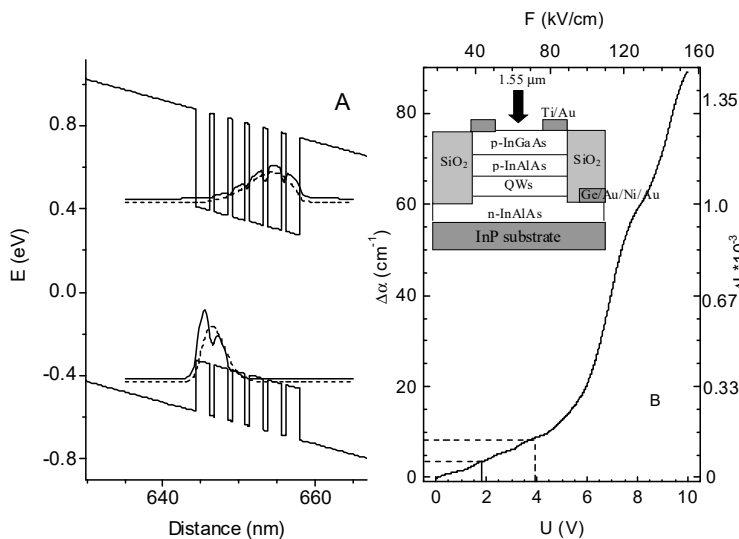


Рис.1. (А) Распределение волновых функций электронов и дырок в электрическом поле напряженностью 100 кВ/см для однородной InGaAlAs/InAlAs КЯ (черная прерывистая кривая) и цифровой КЯ (красная сплошная кривая). (В) Зависимость изменения коэффициента поглощения от напряжения. На вставке изображена геометрия эксперимента. В качестве источника света с длиной волны 1.55 мкм использовался полупроводниковый лазер с шириной линии 200 ГГц

Литература

1. E.T. Kunkee et al., IEEE J. of Quantum Electronics, **43**(8), 641 (2007).

**ГИБРИДНЫЙ СКОРОСТНОЙ ФОТОПРИЕМНИК НА ОСНОВЕ
InAlAs/InGaAs-ФОТОДИОДА И ТРАНСИМПЕДАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ**

**К.С. Журавлев¹, В.С. Арыков², И.В. Юнусов², Д.В. Скок³,
И.Б. Чистохин¹, М.С. Аксенов¹, А.М. Гилинский¹, Д.В. Дмитриев¹*

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

²ООО «Ай Эм Тех», Пр. Кирова, 51а, строение 5, 634041, Томск

³АО НПО «ЭЛВИС», а/я 19, 124460, Москва

**A HYBRID HIGH-SPEED PHOTODETECTOR COMPRISING
AN InAlAs/InGaAs PHOTODIODE AND A TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER**

**K.S. Zhuravlev¹, V.S. Arykov², I.V. Yunusov², D.V. Skok³,
I.B. Chistokhin¹, M.S. Aksenov¹, A.M. Gilinsky¹ and D.V. Dmitriev¹*

¹A.V. Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics,
Academician Lavrentiev Av., 13, 630090, Novosibirsk, e-mail: zhur@isp.nsc.ru

²Infrared and Microwave Technologies LLC, pr. Kirova, bld. 5, 634041, Tomsk

³ELVEES RnD Center, JSC, P.O.B. 19, 124460, Moscow

The design of a high speed hybrid photoreceiver module for optical link analog UHF signal and digital data transmission lines comprising a high speed *pin*-photodiode and a transimpedance amplifier (TIA) is presented in this work. A partially-depleted absorber mesa photodiode made of an InAlAs/InGaAs heterostructure grown by molecular beam epitaxy is used in the design. The diode is mounted on an intermediate carrier board and installed into a TO-8 type can side by side with a 2.5 GHz TIA developed by ELVEES RnD Center. The TIA feedback resistance equals 1 kOhm which results in a 600 V/W photodetector sensitivity. Both the symmetric and asymmetric TIA output transfer line options can be used. The input optical radiation can be fed via a fiber link or using an open space circuit, depending on the assembly requirements.

Для передачи аналоговых СВЧ-сигналов по оптоволоконным линиям требуются фотоприемники с чувствительностью, значительно превосходящей величину чувствительности *pin*-фотодиода $\approx 0,5\text{--}1$ А/Вт. Применение лавинных фотодиодов в таких фотоприёмниках лимитируется необходимостью использования повышенного напряжения питания и стабилизации рабочего режима. В настоящей работе представлен фотоприёмный модуль для оптоволоконных систем передачи СВЧ-сигналов и цифровых данных, выполненный на основе скоростного *pin*-фотодиода и трансимпедансного усилителя с низким напряжением питания. Скоростной *pin*-фотодиод выполнен на основе InAlAs/InGaAs/InP гетероструктуры, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии [1, 2], и обеспечивает

поглощение излучения в диапазоне длин волн 1,0–1,65 мкм. Использована конструкция фотодиода с частично обедненным поглощающим слоем, позволяющая снизить влияние пространственного заряда и расширить рабочий диапазон частот фотодиода. Фотодиод выполнен в виде мезоструктуры с диаметром фотоприёмной площадки 20÷40 мкм и подачей излучения со стороны утоненной подложки гетероструктуры, на которую нанесено просветляющее покрытие. Размер чипа фотодиода равен 500×500 мкм², коэффициент преобразования (чувствительность) составляет 0.6 А/Вт. Для установки в корпус чип фотодиода монтируется на промежуточный носитель методом переворота кристалла. Усиление выходного сигнала фотодиода обеспечивает малошумящий бескорпусной трансимпедансный усилитель разработки АО НПЦ «ЭЛВИС», обеспечивающий диапазон рабочих частот до 2.5 ГГц. Чип усилителя монтируется совместно с чипом фотодиода в корпусе ТО-8. Усилитель имеет возможность использования как симметричной, так и несимметричной нагрузки. Сопротивление обратной связи трансимпедансного усилителя равно 1 кОм, что обеспечивает чувствительность фотоприёмника 600 В/Вт на нагрузке 50 Ом. В зависимости от решаемой задачи, подача излучения на фотодетектор может производиться через оптоволокно либо с помощью проекционной оптической схемы. Конструкция гибридного фотоприёмника иллюстрируется на рис. 1.

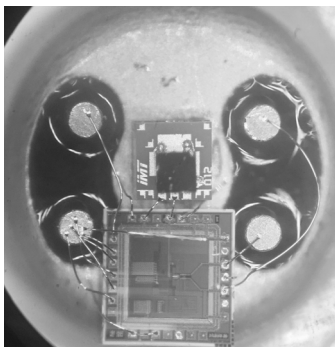


Рис.1. Монтаж чипа *pin*-фотодиода (в центре) и трансимпедансного усилителя в корпусе фотоприёмника

Литература

1. К.С. Журавлев и др., ЖТФ, **91**(7), 1158 (2021).
2. K.S. Zhuravlev et al., J. Semicond., **43**, 012302 (2022).

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВИЛ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ
ГЕНЕРАЦИИ 1550 нм С РАЗЛИЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ АПЕРТУРЫ**

^{*}К.О. Воронаев¹, Б.И. Селезнев², И.О. Воронаева¹

¹АО "ОКБ-Планета"

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

e-mail: Kirill.Voropaev@novsu.ru

²Новгородский Государственный университет имени Ярослава Мудрого

Россия, 173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, дом 41.

**RESEARCH OF BEAM DIVERGENCE OF VCSEL 1550 nm WITH DIFFERENT
APERTURE SIZE**

^{*}К.О. Voropaev¹, B.I. Seleznev², I.O. Voropaeva¹

¹OKB-Planeta PLC Russia, 173004 V. Novgorod, Fedorovskiy Ruchey 2/13.

e-mail: Kirill.Voropaev@novsu.ru

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,

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

Presents the research of beam divergence of VCSELs 1550 nm with aperture size: 5 μm , 6 μm , 7 μm , 8 μm . For measurement used a spectral camera with cooled InGaAs matrix, based on motorized platform. In process of measurement was analyzed the size of laser beam on different distance from the camera's matrix. In result was determined that the VCSELs have good capability with single-mode fiber and have low beam divergence.

Телекоммуникационные волоконно-оптические системы (ТВОС) заняли основное место в мировой инфраструктуре сетей связи. Общий принцип функционирования состоит в электрооптическом преобразовании информационного сигнала, передаче модулированного оптического сигнала по волоконному световоду и обратном оптико-электрическом преобразовании в диапазон модулирующих частот [1]. Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) 1550 нм представляют большой интерес для реализации оптической передачи в системах ТВОС.

В системах ТВОС, работающих в области длины волны 1550 нм, применяется, как правило, одномодовое оптическое волокно. Для стыковки кристалла ВИЛ 1550 нм с одномодовым волокном важно знать расходимость излучения лазерного пучка в дальнем поле для подбора оптимальных параметров стыкуемого с кристаллом волоконно-оптического пигтейла и, как следствие, получения максимальной эффективности ввода излучения в оптическое волокно.

Для получения генерации ВИЛ в спектральном диапазоне 1550 нм, в настоящей работе использовались ВИЛ в конструкции, совмещающей в

себе активную область на основе твердых растворов, выращенных на подложке InP (InAlGaAs/InP) и высокоэффективные брэгговские отражатели на основе AlGaAs/GaAs.

Для анализа полного угла расходимости излучения и исследования профиля лазерного пучка в данной работе применялась спектральная камера с охлаждаемой InGaAs матрицей Cinogy 640-S, находящаяся на моторизированной платформе.

В качестве экспериментальных образцов использовались кристаллы ВИЛ 1550 нм, смонтированные на основании корпуса КТ-1 (аналог ТО-18). Тестируемые образцы закреплялись в шести осевом кинематическом держателе для их юстировки относительно матрицы камеры. На исследуемые образцы подавался ток величиной 10 мА. Для анализа расходимости проводились измерения диаметра лазерного пучка каждого образца в четырех точках, равноудаленных от камеры, и в дальнейшем для каждого из образцов было построено плоское сечение пучка, по которому определялось значение расходимости излучения. В эксперименте были исследованы ВИЛ 1550 нм с размерами апертуры 5 мкм, 6 мкм, 7 мкм, 8 мкм. Результаты, полученные в ходе эксперимента, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений полного угла расходимости излучения ВИЛ 1550 нм

№	Ø апертуры, мкм	Угол расходимости по оси x, °	Угол расходимости по оси y, °
1	5	11,3	10,3
2	6	11	10,4
3	7	10,3	10
4	8	11,8	11,6

При проведении исследований было определено, что расходимость излучения исследуемых ВИЛ 1550 нм не имеет сильной зависимости угла расходимости излучения в рамках исследованных размеров апертур. Так же было установлено, что лазерный пучок имеет симметричную диаграмму направленности. В свою очередь проведенные исследования позволяют говорить о том, что исследуемые ВИЛ обладают хорошей согласованностью с оптическим волокном за счет круглой формы пятна, а также малой расходимости излучения.

Литература

1. М. Белкин, В. Яковлев, Электроника, 3, 92 (2015).

**СВЕРХБЫСТРАЯ ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ ПОРЯДКОВ ДИФРАКЦИИ НА МЕТАПОВЕРХНОСТИ
ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ МИ-РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТИЦ**

^{*}Д.Н. Гулькин¹, А.С. Шорохов¹, В.С. Снизирёв¹, В.О. Бессонов^{1,2}, А.А. Федянин¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, 119991, Москва,
ул. Ленинские Горы, 1-2, e-mail: gulkin@nanolab.phys.msu.ru

²ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071, Москва, Ленинский пр-т., 31-4

**ULTRAFAST ALL-OPTICAL INTENSITY MODULATION OF DIFFRACTION ORDERS
BY GAAS METASURFACE COMPOSED OF MIE-RESONANT PARTICLES**

^{*}D.N. Gulkin¹, A.S. Shorokhov¹, V.S. Snigirev¹, V.O. Bessonov^{1,2}, A.A. Fedyanin¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, GSP-1,
1-2 Leninskiye Gory, e-mail: gulkin@nanolab.phys.msu.ru

²Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences,
119071, Moscow, Leninskiy pr., 31-4

Modern applied and fundamental problems of photonic integrated circuits need the construction of various elements, such as ultrafast filters, sensors, and switchers allowed to control of the light propagation in free space. The most preferred method for such applications is all-optical control method, which can be implemented using semiconductor metasurfaces. In this work, subpicosecond all-optical control of light diffraction on metasurfaces optimized for phase control and consisting of trimers of Mie-resonant GaAs particles is demonstrated. An optically induced modulation of the intensity of main diffraction orders is achieved, the maximum value of which reaches 16% at a pump energy density of 4.5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. It is one of the largest percent for such low used fluence value.

Современные прикладные и фундаментальные задачи фотонных интегральных схем требуют создания различных элементов, таких как сверхбыстрые фильтры, датчики и переключатели, позволяющих управлять распространением оптического сигнала (света) в свободном пространстве. Наиболее предпочтительным способ контроля свойствами света для таких приложений является полностью оптический метод. Благодаря нему можно модифицировать электромагнитное поле, локализованное в объектах, не изменяя их геометрию, и можно управлять интенсивностью и направлением распространения, рассеянного на них света. Известно [1], что подобного можно достичь с помощью объединения большого числа различных частиц с резонансами типа Ми в метаповерхности. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию эффектов рассеяния света на полупроводниковой метаповерхности из арсенида галлия (GaAs, [2]),

состоящей из ми-резонансных частиц. В работе реализовано оптическое переключение света с низким флюенсом, заключающееся в изменении диаграммы рассеяния метаповерхности. Исследование производится комбинацией метода «накачка-зонд» с использованием фемтосекундных лазерных импульсов с методом визуализацией направления распространения света в пространстве волновых векторов (фурье-плоскости) [3].

Изготовление образцов метаповерхностей (изображены на рис.1а) происходит с помощью электронно-лучевой литографии на предварительной подложке и до формирования слоёв основной подложки (preprocessing). Метод также включает в себя молекулярно-пучковую эпитаксию, реактивное ионное травление, эпитаксиальный перенос, а также этап атомного слоевого осаждения оксида алюминия. Данная технология позволяет отводить и перераспределять тепло с образца, создаваемое фемтосекундным лазером, что существенным образом повышает качество и термоустойчивость структуры.

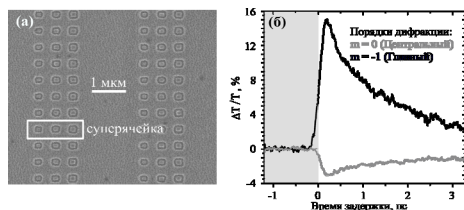


Рис. 1. (а) РЭМ-изображение метаповерхности, состоящей из олигомеров ми-резонансных частиц из GaAs. (б) Модуляция коэффициента пропускания в направлении $m = 0, -1$ дифракционных порядков рассеяния света на метаповерхности

Методом «накачка-зонд» экспериментально обнаружена оптически-индуцированная модуляция интенсивности главных дифракционных максимумов, достигающая 16% для длины волны накачки 835 нм при плотности энергии накачки 4.5 мкДж/см^2 (рис. 1б). Полученный результат свидетельствует о возможности полностью оптического способа управления интенсивностью света главных дифракционных максимумов на субпикосекундных масштабах времени. Эффект модуляции происходит вследствие оптической генерации свободных носителей в GaAs, ведущей к неравномерному изменению показателей преломления резонансных частиц олигомера и соответствующему изменению диаграммы рассеяния метаповерхности.

Литература

1. M.R. Shcherbakov et al., Nature Commun., **8**(1), 17 (2017).
2. B.R. Bennett et al., IEEE J. Quantum Electron., **26**(1), 113–122 (1990).
3. S. Massenot et al., Appl. Phys. Lett., **91**(24), 243102 (2007).

ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ В ЦЕПОЧКАХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОАНТЕНН С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕРИАЛА С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

****А.А. Ибрагимов¹, В.А. Ситнянский¹, Д.Ф. Ягудин¹, А.С. Шорохов¹, А.А. Федянин¹***

¹Физический факультет, Московский Государственный Университет им. Ломоносова
Москва 119991, Россия, e-mail: ibragimov@nanolab.phys.msu.ru

ALL-OPTICAL MODULATION IN CHAINS OF SILICON NANOANTENNAS USING PHASE-CHANGE MATERIAL

****A.A. Ibragimov¹, V.A. Sitnianskii¹, D.F. Yagudin¹, A.S. Shorokhov¹, A.A. Fedyanin¹***

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
email: ibragimov@nanolab.phys.msu.ru

Dielectric nanoantennas are a modern trend in photonics, whose objective is the efficient control of light on the sub-wavelength scale. Optical structures made up of nanoantennas can propagate light over sufficiently long distances with almost no loss, opening up vast opportunities to incorporate them into existing optical integrated circuits. In addition, due to their intrinsic resonance properties, such objects can be relevant in tasks of active light control through external influences.

Диэлектрические наноантенны представляют собой современное направление фотоники, задачей которого является эффективное управление светом на субволновом масштабе. Оптические структуры, состоящие из наноантенн, могут распространять свет на достаточно большие расстояния почти без потерь, что открывает широкие возможности их внедрения в существующие оптические интегральные схемы. Кроме того, благодаря внутренне присущим им резонансным свойствам, такие объекты могут быть актуальны в задачах активного управления светом за счет внешнего воздействия.

Представленная работа посвящена численному исследованию эффекта полностью оптического переключения в одномерной цепочке кремниевых наноантенн, объединенных с тонким слоем материала с фазовым переходом. Геометрия структуры подобрана по аналогии с [1] таким образом, чтобы резонанс в спектре ее пропускания попадал в телекоммуникационный с-диапазон (~1.55 мкм). При этом добротность подобного резонанса достигает порядка 10^4 . Цепочка состоит из кремниевых наночастиц прямоугольного профиля с параболическим сужением их ширины от края к центру структуры, при этом каждая из наночастиц поддерживает электрический дипольный резонанс Ми-типа.

Оптическое пропускание структуры модулируется за счет изменения фазового состояния тонкого слоя халькогенидного материала типа GST [2], который наносится тонким слоем на поверхность центральной наноантенны в массиве. Подобные материалы обладают выраженным контрастом комплексного показателя преломления между аморфной и кристаллической фазами. Более того, фазовый переход является обратимым, что позволяет материалу сохранять свои свойства на протяжении многих циклов перезаписи [3]. Данный эффект позволяет управлять оптической амплитудой оптического сигнала, распространяющегося через наноструктуру, в зависимости от фазового состояния материала. В представленной работе было численно показано относительное изменение пропускания в цепочке наноантенн $\left| \frac{T_{amorph} - T_{cryst}}{T_{amorph}} \right| \simeq 0.95$. Также было продемонстрировано переключение пропускания структуры за характерное время порядка ~ 50 нс. При этом переключение между аморфным и кристаллическим состояниями происходило за счет лазерных импульсов с характерной энергией 150 пДж, распространяющихся в структуре [4]. Полученные результаты могут быть использованы для создания эффективных интегральных модуляторов света, в том числе для оптических нейроморфных вычислений [5, 6].

Литература

1. L. Ding et al., ACS Photonics, **7**, 1001–1008 (2020).
2. Y. Zhang et al., Nat. Commun., **10**, (2019).
3. J.A. Nekuda Malik, MRS Bull., **39**, 656–657 (2014).
4. Y. Ikuma et al., Electron. Lett., **46**, 368 (2010).
5. F. Brücknerhoff-Plückelmann, J. Appl. Phys., **129**, 151103 (2021).
6. W. Zhang, Nat. Rev. Mater., **4**, 150–168 (2019).

**ЭЛЕКТРОИНДУЦИРОВАННАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ МЕТАПОВЕРХНОСТЯМИ**

****Н.Д. Машаров, А.А. Ибрагимов, А.С. Шорохов, А.А. Федянин***

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра квантовой электроники,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 2,
е-mail: masharov@nanolab.phys.msu.ru

**ELECTRICALLY INDUCED MODULATION OF LIGHT
BY SEMICONDUCTOR METASURFACES**

****N.D. Masharov, A.A. Ibragimov, A.S. Shorokhov, A.A. Fedyanin***

Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of physics, department of
quantum electronics, Russia, 119991 Moscow, Leninskie gory 1, building 2,
е-mail: masharov@nanolab.phys.msu.ru

A numerical and experimental study of a structure the geometry of which is a subwavelength array of cylindrical holes etched in a p-AlGaAs/i-GaAs/n-AlGaAs structure was carried out. This structure is relatively easy to manufacture.

The geometry, in which cylindrical holes are replaced by rectangular cut-outs, which should provide more significant changes in the optical response, was also considered. In addition, this geometry will make it possible to control not only the integral value of the energy of the reflected electromagnetic wave, but also its distribution in space.

The use of GaAs as the main material of the heterostructure is due to significant changes in its optical properties upon the injection of carriers.

Changes in the reflection spectrum upon carrier injection in the first geometry are observed in the optical range of electromagnetic waves, near $\lambda = 580$ nm. But the spectral region $\lambda = 900$ nm is of greatest interest in both geometries, since in this region gallium arsenide acquires the property of optical transparency, and the change in the refractive index and absorption during carrier injection is maximum.

Оптические метаповерхности – это плоские массивы наноструктур способные преобразовывать фазу, амплитуду и поляризацию световых волн [1]. Однако после изготовления оптический отклик метаповерхности не может быть изменен по желанию, поэтому важной задачей является создание перестраиваемых метаустройств в зависимости от внешних параметров. Для решения данной проблемы может быть использован

механизм инжекции свободных носителей в материал наноантенн, либо с помощью оптических импульсов [2], либо с помощью приложения внешнего электрического поля [3]. Именно второй подход был рассмотрен в данной исследовательской работе.



Рис. 1. Схемы двух вариантов геометрий метаповерхности

В данной работе было проведено численное и экспериментальное исследование структуры, геометрия которой представляет собой субволновую массив цилиндрических отверстий (см. рис. 1), протравленных в структуре типа p-AlGaAs/i-GaAs/n-AlGaAs. Выбор наночилиндров в качестве элементов данных структур обусловлен сравнительной простотой их изготовления.

Также было проведено численное исследование геометрии, в которой цилиндрические отверстия заменяются на прямоугольные вырезы (см. рис. 1), что должно обеспечивать более значительные изменения оптического отклика [4]. Кроме того, данная геометрия позволит управлять не только интегральной величиной энергии, отраженной электромагнитной волны, но и ее распределением в пространстве.

Использование GaAs как основного материала гетероструктуры обусловлено значительными изменениями его оптических свойств при инжекции носителей.

Изменения в спектре отражения при инжекции носителей в первой геометрии наблюдаются в оптическом диапазоне электромагнитных волн, вблизи $\lambda = 580$ нм. Но наибольший интерес в обеих геометриях представляет спектральная область $\lambda = 900$ нм, так как в данной области арсенид галлия приобретает свойство оптической прозрачности, а изменение показателя преломления и поглощения при инжекции носителей максимально.

Литература

1. A.M. Shaltout, V.M. Shalaev et al., Science, **364**(6441) (2019).
2. L. Ding, D. Morits et al., ACS Photonics, **7**, 1001–1008 (2020).
3. W. Zhang and J. Yao, Nat. Commun., **9**, 1396 (2018).
4. M. Lawrence, D.R. Barton III et al., Nat. Commun., **15**, 956–961 (2020).

ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

^{*}В.А. Ситнянский¹, Д.Н. Гулькин¹, А.С. Шорохов¹, И.С. Васильевский², А.А. Федянин¹

¹Физический факультет,

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Ленинские горы д. 1, Москва 119991, Россия
e-mail: sitnyansky@nanolab.phys.msu.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
(Московский инженерно-физический институт),
Каширское ш. 31, Москва 115409, Россия

ALL-OPTICAL MODULATOR BASED ON INTEGRATED WAVEGUIDE STRUCTURES OF GALLIUM ARSENIDE

^{*}V.A. Sitnianskii¹, D.N. Gulkin¹, A.S. Shorokhov¹, I.S. Vasil'evskii², A.A. Fedyanin¹

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russian Federation,
e-mail: sitnyansky@nanolab.phys.msu.ru

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

The development of reconfigurable nanophotonic elements is the most important task in modern optics. One promising solution to achieve this goal is all-optical switching. In this study, we propose a system that forms an ultrafast gallium arsenide all-optical modulator placed on a glass substrate. The work is devoted to the numerical analysis of the proposed design, the optimization of geometric parameters, the development of fabrication technology, and the methodology for experimental confirmation of the results obtained.

Разработка активных нанофотонных элементов является важнейшей задачей современной оптики. Одно из перспективных направлений – полностью оптическое переключение [1]. Это явление можно охарактеризовать как управляемое изменение параметров системы за счёт накачки мощным лазерным, приводящей к модуляции оптического отклика. Так, например, в работе [2] было продемонстрировано полностью оптическое переключение, основанное на изменении направления рассеяния света на асимметричном нанодимере из арсенида галлия.

В данной работе продемонстрирована полностью оптическая модуляция эффективности ввода излучения в волновод через оптическую наноантенну. Она возникает вследствие изменения показателей преломления n и экстинкции k материала структуры, которое происходит за счёт

инъекции свободных носителей заряда в объем вещества с помощью накачки мощным лазерным импульсом

На первом этапе было проведено численное исследование предлагаемой структуры. Моделируемую систему составили три последовательно связанных интегральных элемента: асимметричная наноантенна в виде димера, волновод и дифракционная решётка для выведения излучения из плоскости образца. Используя метод конечных разностей во временной области, были получены все геометрические параметры системы, а также значение модуляции пропускания волновода, возникающей из-за накачки димера.

Следующим этапом работы стало создание структур на основе GaAs по оптимальной топологии. На выращенной эпитаксиальной гетероструктуре GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs с толщиной рабочего слоя $h(\text{GaAs}) = 90$ нм был осажден методом PECVD вспомогательный слой с толщиной $h(\text{SiO}_2) = 100$ нм. Затем структура была перенесена на подложку из стекла с использованием эпоксидного клея. С помощью механической шлифовки и полировки подложка GaAs была уменьшена до толщины ~ 30 микрон, после чего полностью вытравлена перекисно-аммиачным селективным травителем. Стоп-слой Al_xGa_{1-x}As был удален травлением в разбавленном буферном травителе на основе HF. Заключительными этапами изготовления оптического модулятора стали электронно-лучевая литография с размерами дисков димеров порядка 100 нм с последующим реактивным ионным травлением в CL₂-плазме.

В качестве экспериментального подтверждения модуляции пропускания волновода был выбран метод «накачка-зонд». Такой подход применяется для исследования динамики изучаемых эффектов благодаря возможности регулирования времени задержки между импульсами.

В результате проделанной работы предложена система полностью оптического модулятора на основе интегральных структур из арсенида галлия. Проведён её численный анализ, разработана технология фабрикация структуры, а также предложена методика проведения экспериментальных измерений. Расчёты демонстрируют относительную модуляцию эффективности заведения излучения в волновод $\delta T/T_0 \sim 9\%$ при интенсивности накачки $I = 20.8$ ГВт/см². Таким образом, предложенная система может использоваться в качестве логического элемента в фотонных интегральных схемах.

Литература

1. M.R. Shcherbakov et al., Nature Communications, **8**, 1-6 (2017).
2. V.S. Snigirev et al., Journal of Physics: Conference Series, **1092**, 012141 (2018).

**СРАВНЕНИЕ СВЧ ХАРАКТЕРИСТИК 0.15 МКМ-PHEMT ТРАНЗИСТОРОВ
С ДЕЛЬТА- И КОМБИНИРОВАННЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ В РЕЖИМЕ
БОЛЬШОГО СИГНАЛА**

**И.С. Васильевский, А.А. Горелов, В.В. Локотко, Д.А. Сафонов, Н.И. Каргин*

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

**COMPARISON OF LARGE SIGNAL MICROWAVE GAIN
OF THE DELTA- AND COMBINATION DOPED 0.15 μm - PHEMT TRANSISTORS**

**I.S. Vasil'evskii, A.A. Gorelov, V.V. Lokotko, D.A. Safonov, N.I. Kargin*

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

The comparison of DC and microwave characteristics of the two 0.15 μm PHEMT transistor types differed by Si doping strategy is performed. Single side Si-delta doped PHEMT shows kink-effect behavior which degrades linearity and large signal gain due to intermodulation distortions. The novel combination doped n+ δ -PHEMT heterostructure provides better uniformity of IV characteristics and smaller 5th order intermodulation products probed by double tone signal at 12 GHz.

Усилительные свойства PHEMT транзисторов связаны с рядом факторов – конструкцией гетероструктуры, длиной и расположением затвора, параметрами рещеса. Созданный ранее в НИЯУ МИФИ технологический процесс PHEMT-0.15 для маломощных МИС СВЧ был оптимизирован для усиления на малом сигнале. Одним из отмеченных недостатков являлась неоднородность ВАХ транзистора в области малых напряжений стока, обусловленный кинк-эффектом, наблюдаемым во многих НЕМТ структурах [1]. Одной из вероятных причин эффекта может быть сильное дельта-легирование кремнием в слое AlGaAs, при котором часть доноров могут быть глубокими и неполностью ионизованными [2, 3]. Эта гипотеза подтверждается влиянием подсветки на ВАХ транзистора, при которой неоднородность ВАХ исчезала. Устранение кинк-эффекта при увеличении стокового напряжения мы связываем с ионизацией доноров тянущим электрическим полем.

Равномерность ветвей ВАХ – зависимости тока стока от напряжения стока необходима для снижения интермодуляционных искажений при усилении СВЧ сигналов с большой амплитудой. Для нивелирования негативного кинк- эффекта нами была опробована концепция комбинированного легирования, при которой часть концентрации доноров перераспре-

делена из дельта-слоя в легированный барьер AlGaAs. В этом случае зонная диаграмма имеет более пологий профиль в области широкозонного барьера AlGaAs, притом, исследования электронного транспорта и магнетотранспорта показали отсутствие параллельной проводимости в AlGaAs: Si слое.

По стандартному технологическому процессу PHEMT-0.15 НИЯУ МИФИ были изготовлены 2 типа транзисторов – на структуре 1δ-PHEMT с дельта-легированием Si и с комбинированным легированием (n+δ-PHEMT). Транзисторы имели секционированную структуру с периферией 4x50 мкм, затвор имел грибообразную форму и выполнялся методом электронно-лучевой литографии.

Исследованы статические ВАХ транзисторов обоих типов, затворные характеристики, S-параметры на малом и большом входных сигналах, в т.ч. с использованием двухтонового сигнала, подаваемого с векторного анализатора.

Оба типа транзисторов имели сходные ВАХ и значения крутизны, однако, в комбинированно-легированной структуре кинк-эффект не наблюдался, структура ветвей ВАХ более равномерная (рис. 1).

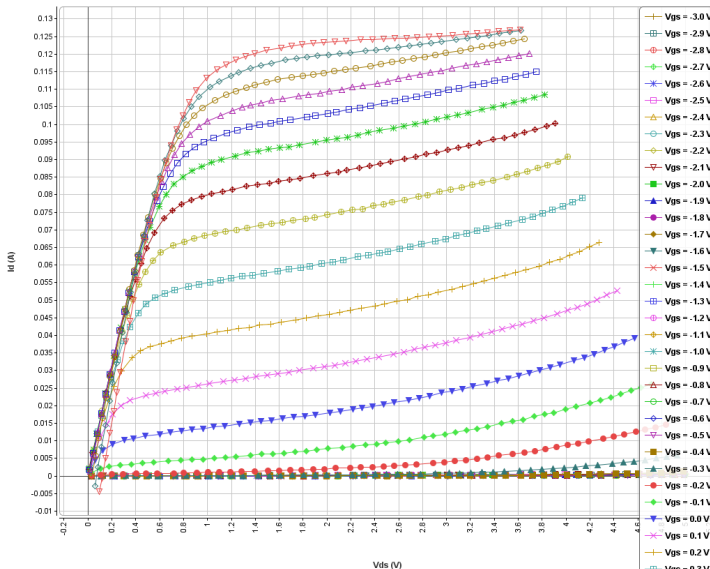


Рис. 1. Вольтамперная характеристика 0.15-мкм PHEMT 4x50 мкм транзистора с комбинированным легированием, кинк-эффект отсутствует

В целом, обе структуры продемонстрировали приблизительно одинаковый (~ 12 дБ) коэффициент усиления в режиме слабого сигнала. Для оценки усилительных свойств в режиме большого входного сигнала транзисторы были измерены в режиме компрессии усиления, зависимости приведены на рисунке 2. Оказалось, что выходная мощность при 1дБ компрессии для 1 δ -PHEMT структуры незначительно (на 0.1 дБ) выше, чем для комбинированно-легированной.

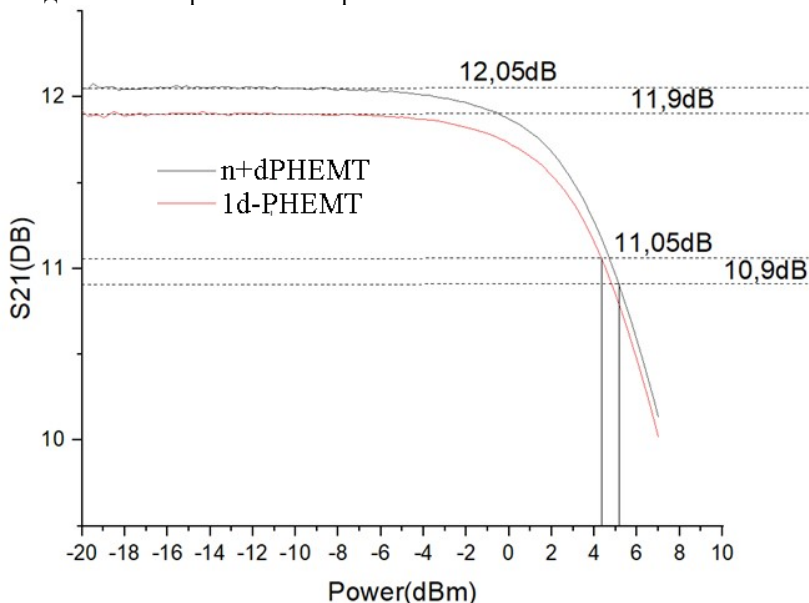


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от мощности входного СВЧ сигнала для 0.15-мкм PHEMT 4x50 мкм транзисторов с комбинированным и с дельта-легированием

Для оценки интермодуляционных искажений на вход подавался двухтоновый сигнал с центром $f_c = 12$ ГГц, отстройкой частоты $\Delta f = 200$ МГц. Результаты измерений спектров выходного сигнала приведены на рис. 3. Видно, что в транзисторе с комбинированным легированием $n+\delta$ -PHEMT амплитуда продуктов интермодуляционных искажений (ИИ) 3го порядка оказывается соразмерной с таковой в 1δ -PHEMT транзисторе, наблюдается снижение мощности ИИ 5го порядка, амплитуда на уровне $-55 \div -60$ дБм, менее, чем амплитуда мощности ИИ 5го порядка, тогда как для 1δ -PHEMT наблюдается более высокий сигнал на уровне $-40 \div -45$ дБм.

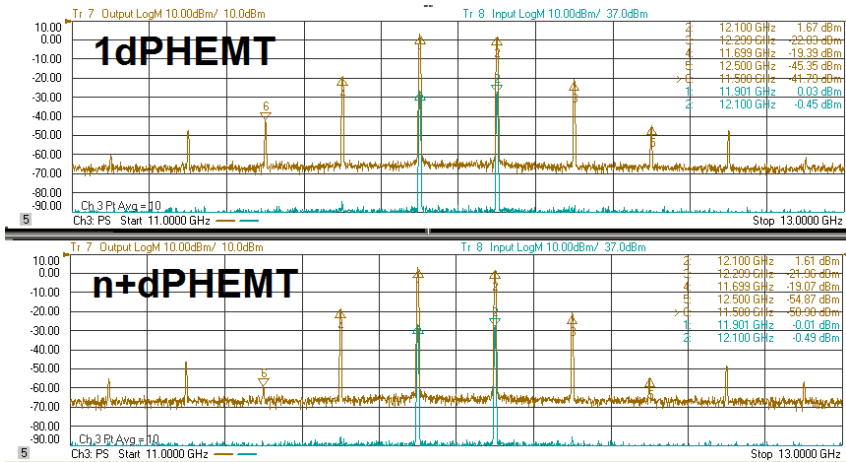


Рис. 3. Сравнение спектров усиления двухтонового сигнала $f_c = 12$ ГГц, $\Delta f = 200$ МГц при входной мощности 0 дБм, для 0.15 мкм x 4x50 мкм транзисторов на основе структур 1δ-PHEMT с дельта-легированием и n+δ-PHEMT с комбинированным легированием

Таким образом, применение PHEMT структуры с комбинированным легированием кремнием позволяет устранить кинк-эффект на ВАХ транзистора, сохранить коэффициент усиления наряду с существенным снижением мощности интермодуляционных искажений 5-го порядка. При этом влияние на продукты интермодуляционных искажений 3-го порядка не наблюдалось.

Исследование выполнено в рамках стратегического проекта НИЯУ МИФИ СП4: «Радиофотоника и квантовая сенсорика» программы «Приоритет-2030» с использованием оборудования центра коллективного пользования НИЯУ МИФИ «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников».

Литература

1. M.H. Somerville et al., IEEE Trans. on Electr. Dev., **47**, 922–930 (2000).
2. Д.А. Сафонов и др., Письма в ЖТФ, **44**(4), 34–41 (2018).
3. D.A. Safonov et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng., **475**, 012034 (2019).

**КРОССПЛАТФОРМЕННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА
НА ПЛАТФОРМЕ InP**

**А.А. Горелов¹, И.С. Васильевский¹, Н.И. Каргин¹, Р.В. Рыжук¹*

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

**CROSS-PLATFORM APPROACH TO MODELING THE ELECTROOPTICAL MACH-
ZEHNDER MODULATOR ON THE InP PLATFORM**

**A.A. Gorelov¹, I.S. Vasil'evskii¹, N.I. Kargin¹, R.V. Ryzhuk¹*

¹National research nuclear University «MEPhI»
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: andrew.a.gorelov@gmail.com

In this work were simulated the basic parameters of 1.55 μm InP Mach-Zehnder modulator using a cross-platform approach. The simulation was carried out by Ansys software. Was found that the -3 dB bandwidth RF signal of the EO modulator exceeds 30 GHz.

Современное развитие широкополосного интернета и телекома 5G, 6G связано с ростом скорости и объемов передаваемой информации. Одним из ключевых элементов таких систем является электрооптический (ЭО) модулятор – устройство, в котором для модуляции оптического излучения используется СВЧ сигнал. Расширение полосы пропускания электрооптических модуляторов на основе соединений группы $A^{III}B^V$ является актуальной задачей развития современных систем связи и радиолокации. Целью настоящей работы являлось комплексное моделирование ЭО модулятора Маха-Цендера на основе InP 1.55 мкм длины волны по величине полосы пропускания СВЧ сигнала.

В табл. 1 представлен процесс разработки ЭО модулятора, включающий в себя несколько основных этапов и ключевые параметры их реализации.

В данной работе использовался кроссплатформенный подход к моделированию работы устройства, определение инварианта среди всех основных параметров для каждого этапа разработки.

Для моделирования электрофизических и оптических свойств волноводной структуры [1, 2] использовались модули, входящие в состав программного пакета Lumerical компании Ansys, параметризация топологии ЭО модулятора и дальнейшая оптимизация структуры проводилась с помощью программного обеспечения Ansys Electronics Desktop.

Таблица 1

Выходные данные каждого этапа разработки ЭО модулятора

Название этапа	Выходные параметры
Квантовое моделирование структуры активной области волновода	Коэффициент поглощения, Δn
Электрофизическое моделирование	ВАХ, ВФХ, профиль распределения носителей зарядов, значение напряженности E в активной области
Оптическое моделирование	Потери в волноводе, n_{eff} , передаточная характеристика
ЭМ моделирование СВЧ линии передач	Коэффициент отражения, коэффициент передачи, $n_{microwave}$
Моделирование на системном уровне	Основные выходные параметры ЭО модулятора

На рис. 1 представлена передаточная характеристика ЭО модулятора.

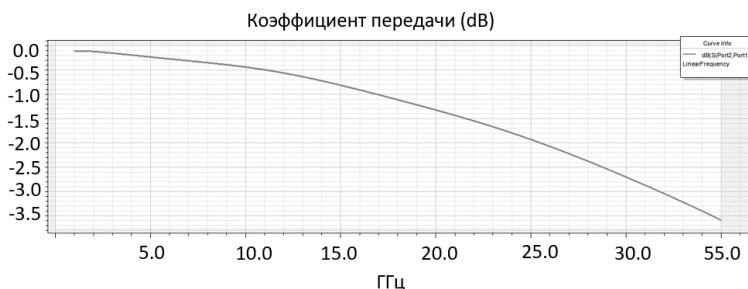


Рис. 1. Коэффициент передачи СВЧ тракта ЭО модулятора

В результате проведенного анализа было установлено, что полоса пропускания ЭО модулятора по уровню -3 дБ превышает 30 ГГц. Полученное значение $n_{microwave} = 3.25$ согласуется с оптическим значением $n_{eff} = 3.21$, что свидетельствует о достаточно хорошем согласовании оптической и СВЧ части.

Работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030» с использованием оборудования центра коллективного пользования НИЯУ МИФИ «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников».

Литература

1. Sh.L. Chuang, Physics of Optoelectronic Devices, 730p (1995).
2. M.U. Sadiq et al., Optics Express, **23**(9), 10905 (2015) <https://doi.org/10.1364/oe.23.010905>.

**ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР
НА ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КВАНТОВОГО ВЫХОДА
ОТ ИСТОЧНИКА ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ**

****Д.О. Заикин, А.А. Тимофеев, Н.И. Каргин***

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

**FABRICATION OF SOLID-STATE OPTICAL ELEMENTS ON
THE DIAMOND SURFACE TO INCREASE THE QUANTUM YIELD
FROM A SINGLE PHOTON SOURCE**

****D.O. Zaikin, A.A. Timofeev, N.I. Kargin***

National Research Nuclear University "MEPhI" (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe highway, 31, e-mail: info@mephi.ru

This article explores the solution to the problem of photon escape from the NV-center using optical structures. With the help of the lens developed by us, the problem of the quantum output of photons from the source is solved. This method makes it possible to significantly increase the light collection of radiation from the source, which will lead to an increase in the value of the intensity index. In the future, this solution can be used for various devices based on the transmission of information using light.

NV-центры в алмазе обладают рядом конкурентных преимуществ, которые делают их одним из наиболее перспективных кандидатов среди других для использования в квантовых приложениях. Главным преимуществом является в их способности флуоресцировать поток одиночных фотонов при комнатной температуре. Надо заметить, что регистрация излучения NV-центра представляет собой достаточно сложную задачу. Основная проблема возникает вследствие высокого коэффициента преломления света алмаза. Это обстоятельство приводит полному внутреннему отражению при углах падения света выше 24.6 градусов. Оптическим системам так же присуще падение интенсивности практически во всех углах. В результате этого интенсивность излучения NV-центра на входе регистрирующей системы может падать на два порядка. Таким образом, встает вопрос о необходимости извлечения излучения с минимальной потерей. Выходом из этой ситуации может стать создание эффективного оптического интерфейса для считывания информации с NV-центров в алмазе.

Таким образом, целью данной работы является разработка методики и изготовление твердотельных оптических структур на поверхности алмазной монокристаллической пластины для улучшения эффективности сбора фотонов.

По причине рекордно высокой твердости создание рельефных структур на поверхности алмаза механической обработкой крайне затруднено. Изготовление таких линз методами механической шлифовки и полировки резко увеличивают время изготовления и стоимость изделий. В настоящее время одним из основных методов формирования рельефных структур на поверхности алмаза, содержащих NV-центры является ионно-лучевое травление. В данной работе для изготовления собирающих фотонных структур на поверхности алмаза использовался способ микрофрезерования фокусированным ионным пучком, которое осуществилось с применением многофункционального исследовательского комплекса LYRA3, состоящий из сканирующего электронного микроскопа с термополюсовым катодом Шоттки (СЭМ) и системы травления остро сфокусированным ионным пучком (ФИП), смонтированными на одной камере образцов.

Для определения оптимальной формы оптических структур и оптимизации их параметров, было осуществлено моделирование процесса распространения света в них в рамках приближения геометрической оптики в вычислительном пакете Comsol Multiphysics (рис.1). Результаты моделирования показали, что наибольший эффект светосбора наблюдается в структурах с геометрией в виде полуэллипсоида и цилиндра. Для проведения исследований влияния возможных искажений профиля поверхности преломляющей линзы на её оптические свойства и действие линзы в зависимости от положения источника фотонов относительно фокуса также использовался указанный выше вычислительный пакет.

Далее, основываясь на итогах расчетов, моделирования, результатов пробных экспериментов по выбору режимов травления и учитывая рекомендации производителя комплекса LYRA3, были разработаны методика попиксельного травления иммерсионной линзы и методика травления

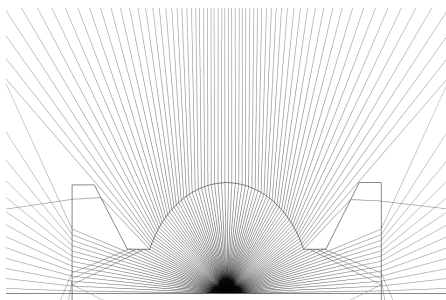


Рис. 1. Ход лучей в расчетной линзе от изотропного точечного источника света

световодов цилиндрической формы на поверхности пластины монокристаллического алмаза. Предварительно, до проведения работ по изготовлению оптических структур, были определены скорости травления алмаза при выбранных режимах.

Количество удаляемого материала при ионно-лучевом травлении зависит от энергии ионов, величины тока ионного пучка и времени задержки ионного пучка в точке образца. На начальном этапе работы по изготовлению линзы методом попиксельного травления был создан паттерн линзы. Паттерн линзы представлял собой проекция линзы с радиальным градиентом серого, начинающийся от центральной точки и изменяющийся во все стороны по мере удаления от центральной точки, в которой уровень серого пикселя ставился в соответствии локальной толщине линзы. Суть метода попиксельного травления заключалась в следующем. Удаление материала происходило послойно, и при этом суммарная задержка ионного пучка в точке образца была прямо пропорционально уровню серого пикселя на паттерне линзы.

Изготовления иммерсионных линз и цилиндрических волноводов на поверхности пластины синтезированного алмаза выполнялись в соответствии разработанным методикам. Характеризация изготовленных твердотельных иммерсионных линз проводилась с помощью СЭМ и на их 3D моделях, полученных с помощью программного пакета AliconaMEX. На 3D моделях были получены профили линз и была измерена шероховатость их поверхностей. Под шероховатостью здесь понимается высокочастотную модуляцию поверхности линзы со случайным отклонением высоты профиля от среднего значения, которая обусловлена некоторыми технологическими аспектами изготовления.

Фокусирующую способность устанавливалась путем моделирования трассировки лучей в моделях с профилями преломляющих поверхностей, полученных на изготовленных линзах. По результатам тестирования осуществлялась корректировка режимов травления. При отладке режимов также учитывался тот факт, что суммарное время изготовления не превышало времени, при котором происходит заметный механический дрейф, влияющий на параметры элементов оптических структур.

Таким образом, в данной работе продемонстрирована практическую возможность применения метода попиксельного травления для изготовления оптических структур на поверхности пластины монокристаллического алмаза с высоким качеством профиля с наноразмерной шероховатостью поверхности, способных собирать светопоток от NV-центра. На рис. 2 приведены снимки некоторых из оптических структур. Качество

поверхности и профили изготовленных структур были подробно охарактеризованы методами СЭМ и путем сравнения реконструированных 3D моделей, полученных с помощью программного пакета AliconaMEX с заданными их параметрами. Моделирование трассировки лучей показало, что иммерсионные линзы примерно в 5 раз эффективнее собирают световой поток по сравнению с выходом фотонов плоской пластины, а для оптического элемента в форме цилиндра этот показатель был незначительно хуже.

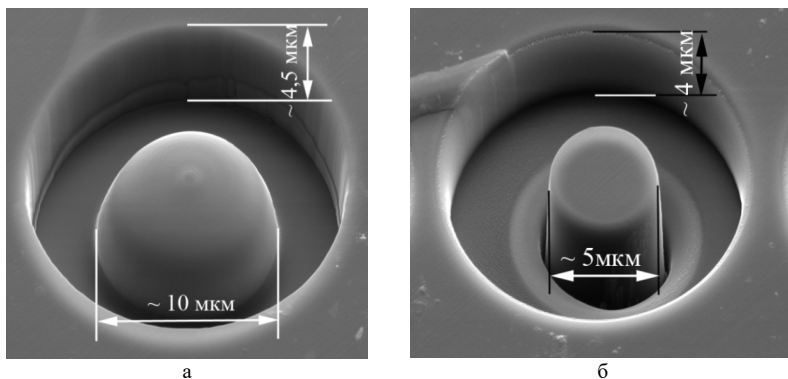


Рис. 2. СЭМ снимки оптических структур, полученные в режиме регистрации вторичных электронов. Снимки растянуты по вертикали для определения размеров с учетом наклона в 55° , а) вид иммерсионной линзы под углом 55° ; б) вид цилиндрического световода под углом 55°

Литература

1. Multiphysics modeling using COMSOL (2015).
2. K.A. Serrels, E. Ramsay, Solid immersion lens applications for nanophotonic devices, (2008) DOI:10.1117/1.3068652.

**К ОПТИМИЗАЦИИ СВЕТИМОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДА
С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ**

****А.Ю. Саунина¹, А.А. Ткач¹, А.Е. Александров², Д.А. Лыпенко², В.Р. Никитенко¹,
И.Р. Набиев^{2,3}, П.С. Самохвалов¹***

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: ayus03@mail.ru

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, дом 31, корпус 4

³Laboratoire de Recherche en Nanosciences,
LRN-EA4682, Université de Reims Champagne-Ardenne
France, 51100 Reims, 51 rue Cognacq Jay

**ON THE OPTIMIZATION OF LUMINANCE AND EFFICIENCY
OF A LIGHT-EMITTING DIODE WITH QUANTUM DOTS:
EXPERIMENT AND THEORETICAL MODEL**

****A.Yu. Saunina¹, A.A. Tkach¹, A.E. Alexandrov², D.A. Lypenko², V.R. Nikitenko¹,
I.R. Nabiev^{2,3}, P.S. Samokhvalov¹***

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: ayus03@mail.ru

²A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS
Russia, 119071 Moscow, Leninsky prospect, 31, korpus 4

³Laboratoire de Recherche en Nanosciences,
LRN-EA4682, Université de Reims Champagne-Ardenne
France, 51100 Reims, 51 rue Cognacq Jay

The results of studies of the influence of the thicknesses of the electron-blocking, hole-conducting and recombination layers on the luminance-voltage and other electrophysical characteristics of a multilayer light-emitting diode with an active layer based on semiconductor quantum dots are presented. Optimized thicknesses and voltages are determined to achieve the maximum efficiency of electroluminescence of the light-emitting diode.

Светодиоды на основе квантовых точек (QDLED) представляют собой многослойную гетероструктуру, где слои квантовых точек (QD) используются в комбинации с органическими слоями различного функционального назначения [1, 2]. Взаимодействие синглетных экситонов, образовавшихся на интерфейсе, с соседними зарядами, накопившимися на том же интерфейсе, снижает эффективность электролюминесценции. Этого можно избежать, если зона рекомбинации (например, QD-слой) имеет значительную толщину, и рекомбинация происходит в глубине этого слоя. Перспективным подходом является введение электронно-блокирующего слоя (EBL), например, из полиметилметакрилата (ПММА)

между электронно-транспортным слоем (ETL) и QD-слоем для балансировки электронного и дырочного токов. Положение энергетических уровней PMMA обеспечивает высокий потенциальный барьер для инжекции электронов в излучающий слой, что позволяет избежать образования в его объёме избыточного заряда, который уменьшает эффективность электролюминесценции [3, 4]. В настоящей работе для QDLED устройств, имеющих структуру ITO/PEDOT:PSS/poly-TPD/PVK/QDs/PMMA/ZnO/Al с излучающим слоем из многооболочечных QD с ядром CdSe и оболочкой ZnS/CdS/ZnS с разными толщинами EBL из PMMA предложена простая теоретическая модель, которая качественно согласуется с экспериментальными данными [1]. С её помощью проведён анализ зависимости яркости QDLED-структуры от соотношения толщин функциональных слоёв.

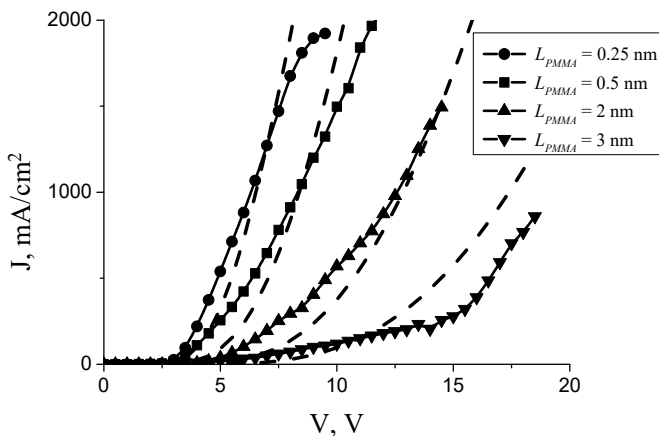


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования вольт-амперных характеристик QDLED (штриховые линии) с экспериментальными данными (линии+символы) для разных толщин слоя PMMA

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 18-19-00588-П.

Литература

1. M. Zvaigzne, A. Alexandrov, A. Tkach et al., *Nanomaterials*, **11**, 2014 (2021).
2. Y.Z. Sun, Y.B. Jiang, X.W. Sun et al., *Chem. Rec.*, **19**, 1729 (2019).
3. P.O. Anikeeva, C.F. Madigan, J.E. Halpert et al., *Phys. Rev. B.*, **78**, 085434 (2008).
4. M. Rahmati, S. Dayneko, M. Pahlevani et al., *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1906742 (2019).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИСКОВОГО ЛАЗЕРА
С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ УДВОЕНИЕМ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ InGaAs/AlGaAs, ВЫРАЩЕННОЙ МЕТОДОМ MOCVD**

****М.Р. Бутаев^{1,2}, В.И. Козловский^{1,2}, Я.К. Скасырский², А.Ю. Андреев³, И.В. Яроцкая³,
А.А. Мармалюк³***

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. +7(962)3716651, e-mail: mbutayev@mail.ru

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., д. 53

³Научно-исследовательский институт «Полус» им. М.Ф. Стельмаха. Россия, 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1

**INVESTIGATION OF A SEMICONDUCTOR DISK LASER WITH INTRACAVITY
FREQUENCY DOUBLING BASED ON THE InGaAs/AlGaAs HETEROSTRUCTURE
GROWN BY MOCVD**

****M.R. Butaev^{1,2}, V.I. Kozlovsky^{1,2}, Y.K. Skasyrsky², A.Yu. Andreev³, I.V. Yarotskaya³,
A.A. Marmalyuk³***

¹National Research Nuclear University «MEPhI». Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, ph. +7(962)3716651, e-mail: mbutayev@mail.ru

²P.N. Lebedev Physical institute. Russia, 119991 Moscow, Leninsky pr. 53

³Polyus research institute of M.F. Stelmakh. Russia, 117342 Moscow, Vvedenskogo St. 3, Building 1

We investigate a semiconductor disk laser based on MOCVD-grown InGaAs/AlGaAs heterostructure pumped by laser diode assembly. The structure was consisted of 10 quantum wells and DBR mirror. Using pulse-periodic regime with a duty cycle 0.1, pulse power of 4 W at wavelength of 1064 nm with slope efficiency of 7.5% were achieved. We have obtained also about 0.1 W at second harmonic of 532 nm using intracavity frequency doubling.

В данной работе сообщается о результатах исследований полупроводникового дискового лазера (ПДЛ) с оптической накачкой, излучающего на длине волны 1.06 мкм [1]. Особенность работы заключается в том, что лазер полностью собран из отечественных компонентов. Структура InGaAs/AlGaAs была выращена методом газофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOCVD) и содержала 10 квантовых ям и брэгговское зеркало.

Схема лазера представлена на рис. 1. К поверхности структуры была пристыкована алмазная пластина. Структура и пластина были закреплены в медном держателе, охлаждаемом водой. В качестве источника излучения накачки использовался лазерный источник, изготовленный компанией Лассард. Он представлял собой сборку из трех линеек лазерных диодов с

волоконным выводом. Излучение накачки фокусировалось на поверхность структуры с помощью двух линз. Резонатор лазера формировался брэгговским зеркалом и внешним сферическим зеркалом. В резонатор помещался нелинейный кристалл типа КТР.

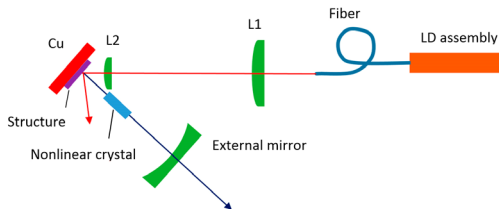


Рис. 1. Оптическая схема ПДЛ

На рис. 2 представлен спектр генерации ПДЛ кроме линий излучения первой и второй гармоник видны линии рассеянного излучения лазера накачки. На рис. 3 представлены зависимости выходной мощности ПДЛ от поглощенной мощности накачки при различных внешних зеркалах.

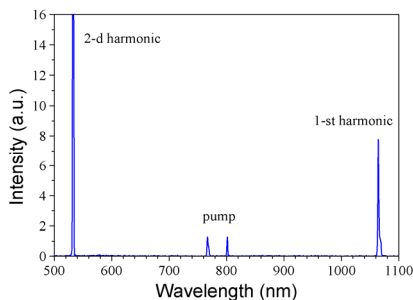


Рис. 2. Спектр излучения ПДЛ

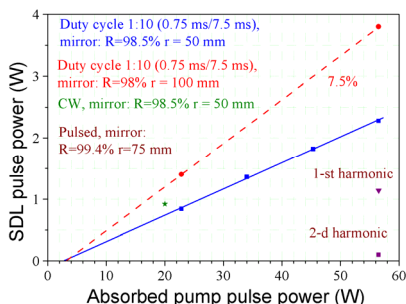


Рис. 3. Зависимость выходной мощности ПДЛ (SDL) от поглощенной мощности накачки

Реализован и исследован ПДЛ с оптической накачкой и внутрирезонаторным удвоением частоты. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90022.

Литература

1. O.G.Okhotnikov, Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology (Weinheim: Wiley-VCH, 2010).

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОАБСОРБИЦИОННОГО МОДУЛЯТОРА НА ПЛАТФОРМЕ InP

^{*}*А.А. Буторина¹, И.С. Васильевский¹, А.А. Горелов¹*

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

DEVELOPMENT OF ELECTROABSORPTION MODULATOR ON PLATFORM InP

^{*}*A.A. Butorina¹, I.S. Vasilievskii¹, A.A. Gorelov¹*

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

Modeling of integrated radio photonic components is relevant because such components are a key technology in the modern world, as they provide a high-speed network for most applications. InP is used as a platform, as the most attractive from the point of view of radiophotonics. A multiquant structure is created using $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ and $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. The simulation of the EAM showed that the mode distribution in the proposed structure takes place in the active region, and the transfer ratio show that they are consistent with the structure.

Создание моделей интегральных радиофотонных компонентов актуально в связи с тем, что такие компоненты являются ключевой составляющей информационно-телекоммуникационных технологий в современном мире. Одна из распространенных технологических платформ – структуры на подложках фосфида индия (InP), привлекательна с точки зрения радиофотоники, так как позволяет создавать полностью монокристаллические радиофотонные интегральные схемы.

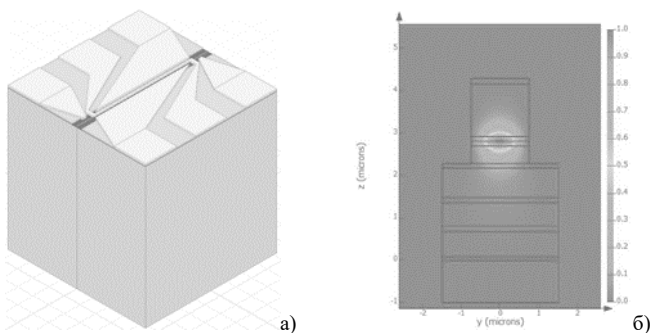


Рис. 1. а) Топология ЭАМ и б) двумерное пространственное распределение первой моды

В СВЧ электроабсорбционном модуляторе (ЭАМ) используются гетероструктуры InP/InGaAsP, InGaAs/InAlAs и InP/InGaAs [1, 2]. Уникальность этих структур заключается в том, что твердые растворы InGaAsP, InGaAs и InAlAs являются изоморфными к фосфиду индия, что позволяет создавать «идеальные» гетеропереходы, пригодные в широком применении в приборостроении.

Модель ЭАМ построена на р-і-п гетероструктуре с активной областью из $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ и $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ множественных квантовых ям (МКЯ) [3]. Топология разработанного ЭАМ показана на рис.1, видны гребневый линейный волновод и копланарная линия передачи СВЧ сигнала (верхне-уровневая металлизация). Рассчитаны оптимальные параметры топологии гребневого волновода, на рис. 1б показано распределение оптической моды, максимум которой приходится на область МКЯ. На рисунке 2 приведен коэффициент передачи S_{21} , полоса модуляции по уровню -3дБ составила 47 ГГц.

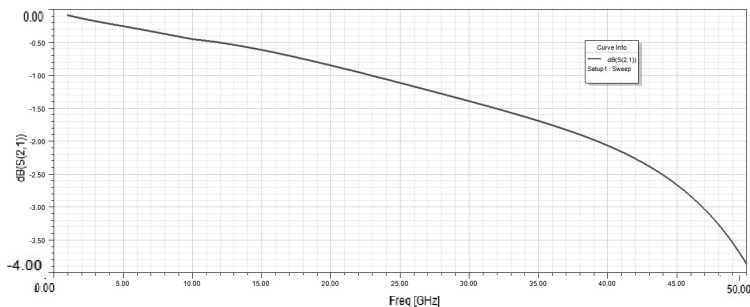


Рис. 2. Зависимость параметра S_{21}

В ходе исследования было проведено моделирование топологии СВЧ и оптических характеристик ЭАМ. Получено распределение моды, подтверждена оптимальная конструкция р-і-п МКЯ структуры для достижения максимального электрооптического отклика. Рассчитано СВЧ согласование, а также показано, что достижимой является полоса модуляции выше 45 ГГц.

Литература

1. R. Plant et al., SPIE, **5435**, 546786 (2004).
2. T. Ido et al., IEEE Photon. Tech. Lett., **9**(10), 1207-1209 (1994).
3. Zh. Shengzhong, Traveling-wave Electroabsorption Modulators, Doctor's thesis, 193p. (1999).

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДИФФУЗИИ ЦИНКА ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ
НА ТОКОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
InGaAs/AlGaAs/GaAs-СТРУКТУР**

**И.С. Набиуллин, А.Н. Ключков, А.Н. Виниченко, И.С. Васильевский*

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

**EFFECT OF ZINC DIFFUSION REGIMES FROM A METALLIC LAYER
ON THE ELECTROLUMINESCENCE CURRENT PARAMETERS
OF THE InGaAs/AlGaAs/GaAs STRUCTURES**

**I.S. Nabiullin, A.N. Klochkov, A.N. Vinichenko, I.S. Vasil'evskii*

National research nuclear university «МЭФТИ»,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskaya street 31, e-mail: ildar.s.n@yandex.ru

The possibility of electroluminescence (EL) in an InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructure doped with a p-type impurity by zinc rapid thermal processing (RTP) from a Zn metal layer has been experimentally demonstrated. The RTP-regimes were: 1) 700 °C, 5 min; 2) 650 °C, 5 min; 3) 650 °C, 15 min. The EL intensity vs current behavior of the samples produced at different temperatures and thermal processing times has been investigated. The study has shown that with the increase of RTP-temperature the EL threshold decreases. Also increasing processing time leads to a higher rate of intensity increase with current.

Существуют различные способы р-легирования полупроводниковых слоев вне процесса роста из различных соединений: ZnAs₂, Ga/As/Zn [1], газовой фазы [2], Zn₃As₂ [3], полимерных диффузатов [4], SiO₂ [5]. Цель данной работы – показать возможность р-легирования путем вжигания металлического цинка из поверхностного слоя для достижения электролюминесценции. Преимуществом такого способа является возможность легирования слоев полупроводника одновременно с вжиганием контактов, а также локального легирования.

В качестве излучающей структуры исследована двойная гетероструктура InGaAs/AlGaAs/GaAs с раздельным ограничением.

Гетероструктура со стороны подложки n-GaAs была эпитаксиально легирована кремнием (концентрация $4.5 \cdot 10^{18}$). Для р-легирования верхних слоев гетероструктуры, использовался Zn в качестве акцепторной примеси. Слой металлического цинка 100 нм был нанесен методом резистивного испарения. Затем методом плазмохимического осаждения был нанесен защитный слой SiO₂. Диффузия цинка проводилась при быстром термическом отжиге в трех режимах: 1) 700 °C, 5 мин; 2) 650 °C, 5 мин; 3) 650 °C,

15 мин. После вжигания цинка на обе стороны пластины были нанесены контакты: низ пластины – Ni/Ge/Au/Ni/Au, верх пластины – Ti/Au/Ti/Au.

Как видно из рисунка 1, наименьший пороговый ток люминесценции демонстрируют структуры с большей температурой отжига ($700\text{ }^{\circ}\text{C}$), а для структур с меньшей температурой отжига ($650\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдается одинаковый пороговый ток, но различный темп роста интенсивности: более резкий рост дают структуры с большим временем отжига (15 минут). Это связано с тем, что с увеличением температуры и времени отжига увеличивается концентрация и глубина диффузии цинка, что напрямую положительно влияет на пороговый ток и эффективность генерации за счет лучшей инжекции дырок в активную область до тех пор, пока примесь не попадет в активную область.

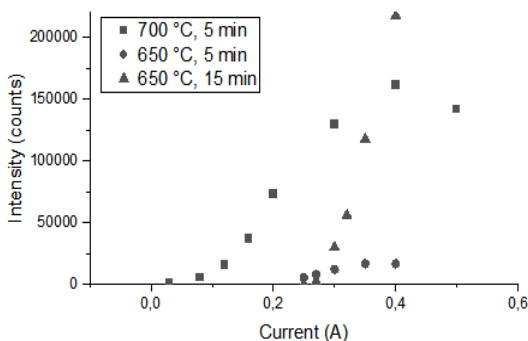


Рис. 1. Зависимость интенсивности ЭЛ от тока для образцов, произведенных в различных режимах

Таким образом, для улучшения качества электролюминесценции (снижения порогового тока и увеличения интенсивности) следует увеличивать температуру и время отжига до предельных для данных материалов и до момента диффузии примеси в активную область.

Литература

1. Y. Matsumoto, Japanese Journal of Applied Physics, **22**(5), 829-835 (1983).
2. В.М. Андреев, О.В. Сулима, Журнал технической физики, **54**(7), 1320–1324 (1984).
3. K.B. Kahan, MRS Online Proc. Libr, **163**(1), 681–684 (2011).
4. Е.Г. Гук и др., Физика и техника полупроводников, **33**(3), 257–269 (1999).
5. T.S. Kalkur et al., MRS Online Proc. Libr. Springer, **92**(1), 461–468 (1987).

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

– А –

Аверьянов Д.В., 114, 116, 118
Аврамчук А.В., 46
Аксенов М.С., 138
Александров А.Е., 160
Александров И.А., 14
Алексяня А.А., 90
Алёшин А.Н., 44
Андреев А.Ю., 162
Арапов Ю.Г., 58
Арзамасцева Д.М., 62, 84, 86
Арьков В.С., 138
Афоненко А.А., 92, 98

– Б –

Багаев Т.А., 92
Баглов А.В., 60, 104, 106
Бакаров А.К., 16, 18
Бессонов В.О., 142
Богданов С.А., 18
Борисенко Д.П., 66
Боченков Г.М., 36
Булавин М.В., 22
Бутаев М.Р., 162
Буторина А.А., 164

– В –

Васильев П.С., 32
Васильевский И.С., 22, 24, 46, 52,
64, 88, 92, 102, 148, 150, 154, 164,
166
Васильченко А.А., 56
Вдовин В.И., 14

Виниченко А.Н., 22, 46, 88, 92, 102,
166
Волков О.Ю., 96, 98
Воропаев К.О., 140
Воропаева И.О., 140

– Г –

Гавриленко В.И., 92
Галиев Р.Р., 92, 96, 98
Галушко А.В., 22
Гвоздовский Д.Ч., 112
Гилинский А.М., 138
Гладышева К.А., 80
Гончаров А.Е., 80
Горевой А.Т., 50
Горелов А.А., 154
Горелов А.А., 24, 150, 164
Горох Г.Г., 68
Горяинов А.Е., 26
Гребенников В.А., 40
Гришаков К.С., 48, 64, 128
Гудина С.В., 58
Гулькин Д.Н., 142, 148
Гуляев Д.В., 136
Гусев А.С., 62, 66, 84, 86

– Д –

Давлятшина А.Р., 46
Данилюк А.Л., 12
Девизцкий О.В., 70
Дегтяренко Н.Н., 128
Дмитриев Д.В., 74, 76, 136, 138
Добуш И.М., 26
Долгов А.К., 98
Долина Е.С., 134

Драгутъ М.В., 30, 32, 34, 38
Дрони́на Е.А., 108, 110
Дюжи́ков И.Н., 96, 98

– Ж –

Желаннов А.В., 36, 40
Журавлев К.С., 14, 16, 18, 72, 74, 78,
76, 136, 138

– З –

Загороднев И.В., 20
Заикин Д.О., 156
Зайцев К.И., 94, 100
Зарубанов А.А., 78
Звонков Б.Н., 58
Зенченко Н.В., 44, 100

– И –

Ибрагимов А.А., 144, 146
Иджи́ М.М., 68

– К –

Кази́ев А.В., 50
Кален́тьев А.А., 26
Кали́ка Е.Б., 132
Кало́шин М.М., 62
Кара́теев И.А., 114, 116, 118
Карги́н Н.И., 24, 52, 62, 66, 84, 86,
150, 154, 156
Карпов С.Н., 18
Кару́зский А.Л., 90
Кати́н К.П., 126, 130, 132, 134
Катьба́ Г.М., 100
Кац В.Н., 118
Кашко И.А., 54

Климов Е.А., 42
Клоков А.Ю., 82
Клочков А.Н., 22, 92, 88, 166
Ковальчук Н.Г., 108, 110
Кожухов А.С., 14
Козловский В.И., 162
Колосовский Д.А., 74, 76, 136
Колосовский Е.А., 136
Комиссаров И.В., 108, 110
Кондратьев О.А., 116, 118
Королик О.В., 106
Косякова А.М., 80
Кочаев А.И., 126
Кулямин П.А., 124

– Л –

Лабунов В.А., 54
Лаврухин Д.В., 94, 100
Ладугин М.А., 92
Лали́н В.Г., 18
Лебе́дев А.И., 120, 122
Литви́нов А.В., 50
Лозовенко А.А., 68
Локотко В.В., 52, 150
Лошкаре́в И.Д., 14
Лукашин В.М., 18
Лукин В.А., 32
Лунин Л.С., 70
Лыпенко Д.А., 160

– М –

Майдэбура Я.Е., 72
Майтама М.А., 42
Мали́н Т.В., 14, 72
Мансу́ров В.Г., 14
Маремья́нин К.В., 92
Мармалюк А.А., 92, 162

Маслов М.М., 126, 130, 132, 134
Машаров Н.Д., 146
Меринов В.Б., 130
Милахин Д.С., 14
Митягин Ю.А., 90
Михалик М.М., 110
Мишарин Д.М., 38
Можеева М.О., 80

– Н –

Набиев И.Р., 160
Набиуллин И.С., 166
Неверов В.Н., 58
Нигериш К.А., 110
Никитенко В.Р., 160
Новикова А.А., 80
Номоев С.А., 102

– О –

Оказов А.К., 34

– П –

Павлов А.Ю., 42
Павлов В.В., 118
Павловский В.В., 96, 98
Парфёнов О.Е., 114, 116, 118
Пашковский А.Б., 18
Пащенко А.С., 70
Пересторонин А.В., 90
Пономарев Д.С., 42, 92, 94, 100
Пономарев С.А., 76
Прищепа С.Л., 108
Прищепа С.Л., 12
Протасов Д.Н., 18
Протасов Д.Ю., 14, 16
Пушкарев С.С., 92, 96, 98

– Р –

Ранов А.Б., 62
Рогачёв И.А., 18
Родионов Д.А., 20
Рубан О.А., 44
Рьжук Р.В., 24, 66, 154
Рындя С.М., 66, 88

– С –

Савельев А.П., 58
Салказанов А.Т., 62, 84, 86
Сальников А.С., 26
Самольга А.А., 88
Самотаев Н.Н., 50
Самохвалов П.С., 160
Саунина А.Ю., 160
Сафаралиев Г.К., 66
Сафонов Д.А., 22, 88, 150
Свит К.А., 78
Свито И.А., 106
Селезнев Б.И., 36, 38, 40, 140
Сибирмовский Ю.Д., 64
Сигловая Н.В., 66
Ситнянский В.А., 144, 148
Скасырский Я.К., 162
Скок Д.В., 138
Скоробогатый М., 94
Случинская И.А., 122
Смирнов Ю.Ю., 30
Смирнова М.О., 62, 84, 86
Снигирёв В.С., 142
Соболев А.С., 42
Соколов И.С., 114, 116, 118
Спектор И.Е., 94
Сторчак В.Г., 114, 116, 118
Султанов А.О., 66

– Т –

Талденков А.Н., 114, 116, 118
Тарелкин С.А., 84, 86
Терёшкин Е.В., 18
Тертышная Ю.А., 46
Тимофеев А.А., 62, 88, 156
Ткач А.А., 160
Токмачёв А.М., 114, 116, 118
Торопов А.И., 74, 76
Трафименко А.Г., 12
Трофимов А.А., 80
Тучковский А.К., 54

– У –

Усачев П.А., 118
Ушаков Д.В., 92, 98

– Ф –

Федоров Д.Г., 36
Федосенко В.С., 68
Федянин А.А., 142, 146, 148, 144
Фельдшерук А.В., 110
Филиппов В.В., 54
Фролов Н.Ю., 82
Фролов Т.В., 100

– Х –

Хабибуллин Р.А., 42, 92, 94, 96, 98,
100
Хмельницкий Р.А., 82
Хорошко Л.С., 60, 104, 106

– Ц –

Цунваза Д.М., 24

– Ч –

Черняев А.П., 90
Чистохин И.Б., 138

– Ш –

Шарков А.И., 82
Шелухин Л.А., 118
Шелушина Н.Г., 58
Шорохов А.С., 142, 144, 146, 148

– Щ –

Щаврук Н.В., 96

– Ы –

Ыскаков А., 22

– Э –

Этрекова М.О., 50

– Ю –

Юнусов И.В., 138

– Я –

Ягудин Д. Ф., 144
Якунин М.В., 58
Яроцкая И.В., 162
Ячменев А.Э., 94

МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

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

25–26 мая 2022 года

СБОРНИК ТРУДОВ

Подписано в печать 28.04.2022. Формат 60×84 1/16.
Печ.л. 10,75. Тираж 100 экз.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ.*

115409, Москва, Каширское ш., 31