

УДК 621

*М.А. Васильева, Т.А. Гаврикова, В.А. Зыков,
В.И. Ильин, В.А. Шалыгин*

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

**АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ
(по материалам 15-й Всероссийской молодежной конференции)**

Статья подводит краткие итоги конференции, отмечены наиболее актуальные результаты, представленные на всех секциях конференции, работы, награжденные дипломами и премиями, и работы, представленные для участия в программе «УМНИК».

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ОПТОЭЛЕКТРОНИКА, КОНФЕРЕНЦИЯ.

В Санкт-Петербурге с 25 по 29 ноября 2013 г. прошла 15-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Организаторами конференции выступили Санкт-Петербургский государственный политехнический и Санкт-Петербургский академический университеты, а также Санкт-Петербургский государственный университет и Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Конференция проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Фонда некоммерческих программ «Династия» и ЗАО «Полупроводниковые приборы». Председатель Программного комитета конференции – академик РАН Р.А. Сурис, председатель Организационного комитета – профессор Л.Е. Воробьев.

В научном форуме приняли участие около 200 человек, представлявших 24 вуза и научных центра из 13 городов России, включая крупные научно-образовательные центры Сибири (Новосибирск, Красноярск, Барнаул, Томск), Урала (Екатеринбург, Оренбург) и Европейской части Рос-

сии (Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Воронеж, Пенза, Ульяновск).

В ходе работы конференции приглашенными ведущими учеными России были прочитаны доклады, знакомящие молодых исследователей с современными проблемами физики, состоянием исследований в области физики полупроводников и наноструктур, проводниковой опто- и наноэлектроники. Доктор физико-математических наук Г.С. Соколовский (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН) представил доклад о нелинейной динамике лазеров на полупроводниковых наноструктурах, а кандидат физико-математических наук А.Н. Поддубный из того же института познакомил студентов и аспирантов с физикой фотонных кристаллов и метаматериалов, рассказал о таких уникальных объектах, как топологические изоляторы. Доктор физико-математических наук В.Т. Ким из ПИЯФ им. Б.П. Константинова посвятил свою презентацию международным исследованиям на Большом адронном коллайдере и вопросам физики бозона Хиггса. Доклады приглашенных ученых задавали высокий тон каждому рабочему дню конференции. Представление

и обсуждение этих докладов сыграло роль мастер-класса для молодых участников.

На пленарных заседаниях было представлено 47 устных докладов студентов и аспирантов. Кроме того, состоялась стендовая сессия, и на ней было представлено 39 докладов молодых ученых. Сборник тезисов [1], а также программа конференции [2] изданы тиражом 200 экземпляров

Среди работ, представленных на секции «Объемные свойства полупроводников», заслуживают внимания исследования радиационно-стимулированного дефектообразования в структурах с барьерами Шоттки Cr-6H-SiC при облучении быстрыми тяжелыми ионами; разработка оригинального варианта метода модуляционной фурье-спектроскопии (позволяет сохранять истинный знак спектра) и его проверка на структурах с эпитаксиальным слоем InSb и с квантовой ямой InGaAs/GaAs. За цикл исследований по изучению влияния одноосной деформации на магнитооптические свойства ферромагнитного полупроводника (Ga,Mn)As Программный комитет удостоил аспиранта Г.С. Димитриева (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) премии имени Е.Ф. Гросса. Аспирант К.А. Барышников из того же института награжден дипломом 1-й степени и премией за теоретические исследования примесного комплекса CrSe₄ в кристалле ZnSe в магнитном поле и влияния эффекта Яна – Теллера на поглощение ультразвука в кристалле.

Работы, представленные на секции «Процессы роста, поверхность, границы раздела», охватывают широкий круг исследований, посвященных изучению морфологии поверхности, рельефа и распределения поверхностного потенциала, образования нанокластеров, изучению на атомном уровне начальных стадий роста, формированию границ раздела в МДП- и гетероструктурах. В работах использованы современные технологические методы: молекулярно-пучковая эпитаксия, газофазная эпитаксия, выращивание структур по механизму пар – жидкость – кристалл, магнетронное осаждение, электрохимическое анодное оксидирование.

Наиболее яркие работы в этом направлении посвящены изучению процессов пассивации поверхностей на атомарном уровне, например, поверхности InAs(111) А тонким фторсодержащим анодным слоем либо путем нитридации поверхности (0001)Al₂O₃(сапфир) аммиаком; исследованию свойств переходного слоя между кубическим (3С) и гексагональным (6Н) политипами SiC; изучению локальной трибозлектризации поверхности эпитаксиальных слоев GaN и GaAs при сканировании их поверхности зондом атомно-силового микроскопа в контактном режиме; исследованию оптических явлений в сильнолегированном *n*-GaN, связанных с рассеянием горячих поверхностных плазмон-поляритонов на дифракционной решетке на поверхности эпитаксиального слоя; изучению возможных механизмов интеркаляции атомов рибидия, нанесенных на поверхность Bi₂Se₃; теоретическому исследованию морфологической устойчивости в многокомпонентных системах, растущих при диффузии отдельных компонентов из окружающей среды; модернизации технологии получения нанопористого алюминия; теоретическому и экспериментальному исследованию поведения основных и неосновных носителей в структурах с приповерхностным дельта-легированием. Работа студента М.А. Василенко (Новосибирский ГТУ), посвященная Монте-Карло-моделированию роста нитевидных нанокристаллов арсенида галлия по механизму пар – жидкость – кристалл при использовании в качестве катализатора капель галлия, а также исследования транспортных свойств окисленных пленок селенида свинца, выполненные студенткой МГУ С.Г. Егоровой, отмечены дипломами 3-й степени и премиями.

Среди исследований по технологии новых полупроводниковых материалов следует выделить работы, посвященные выращиванию слоев азотсодержащих твердых растворов GaPN, GaPNAs, InGaPN на кремниевых подложках. Работа аспиранта М.С. Соболева (Академический университет, Санкт-Петербург) «Молекулярно-пучковая эпитаксия GaP на подложке Si» рекомен-



дована для участия в конкурсе по Программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») в номинации «Научные результаты, обладающие существенной новизной и сверхсрочной перспективой их коммерциализации».

Наибольшее количество докладов было представлено на секции «Гетероструктуры, сверхрешетки, квантовые ямы». Первостепенное внимание уделяется получению, диагностике и исследованию структур на основе кремния, а также полупроводниковых соединений A_3B_5 и A_2B_6 , изучению их энергетического спектра. Приводятся данные о структурах с сегнетоэлектрическими слоями, теоретические и экспериментальные исследования графена и мультиграфенов. Изучены также фотонные системы.

Среди теоретических работ следует отметить численный расчет влияния анизотропных деформаций на излучающий элемент; изучение внутри- и межзонных переходов в асимметричной квантовой яме со спин-орбитальным взаимодействием, разработку динамической теории адмиттанса квантоворазмерных структур. Экспериментально и теоретически изучены поглощение, отражение и эмиссия излучения, фотоэлектрические свойства, магнитооптические явления. Ряд работ посвящен оптимизации параметров наноструктур для различных приборных приложений. Среди экспериментальных работ следует отметить исследования терагерцовой люминесценции на состояниях акцепторов бериллия (Be) в квантовых ямах GaAs/AlGaAs; вольт-фарадных характеристик гетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN; переноса энергии в двойных связанных квантовых ямах ZnCdSe с самоорганизованными квантовыми точками; изучение эволюции спектра излучения квантовых ям InGaN/GaN при увеличении тока накачки и влияния латеральной делокализации носителей тока в квантовых ямах на эффективность светодиодов при высоких уровнях инжекции.

Отдельно отметим оригинальные работы, посвященные исследованию люминесцентных свойств спиновых светоизлучающих диодов с дельта-слоями марганца, в

которых поляризация носителей по спину происходит непосредственно в активной области путем обменного взаимодействия между магнитными ионами марганца в дельта-легированном слое и носителями в квантовой яме InGaAs. Практический интерес представляют результаты изучения влияния дефектообразования при гамма-нейтронном облучении гетеронаноструктур In(Ga)AlAs/GaAs на их оптоэлектронные свойства. Вызывает также интерес многогранное изучение графенов: экспериментальные исследования рентгено-стимулированного восстановления оксида графена; теоретические исследования электронной структуры мультиграфенов; дисперсионного взаимодействия различных атомов с графеном.

Работа студента СПбГПУ И.С. Махова «Фотолюминесценция дальнего и ближнего ИК диапазона, связанная с примесными донорными состояниями в квантовых ямах *n*-GaAs/AlGaAs», а также проект аспиранта СПбГПУ В.П. Пашенко «Формирование индуцированной электрическим полем акустической сверхрешетки в сегнетоэлектрической тонкой пленке» рекомендованы для участия в конкурсе по Программе «УМНИК» с последующим финансированием проектов-победителей Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Дипломами 2-й степени и денежными премиями Программный комитет наградил аспиранта ИФМ РАН (Нижний Новгород) В.В. Румянцева за экспериментальные исследования длинноволновой инфракрасной фотолюминесценции и фотопроводимости в узкозонных твердых растворах HgCdTe и квантовых ям на слоях HgCdTe разного состава, а также аспирантку СПбГЭТУ М.С. Миронову за теоретический расчет энергетического спектра и волновых функций в структурах с квантовой ямой SiGe/Si/SiGe. Дипломов 3-й степени и премий удостоены студентка СПбГУ Н.Е. Коптева за экспериментальное исследование фотоиндуцированного керровского вращения в микрорезонаторе с квантовой ямой, а также студент МГУ Е.П. Кубашевский за теоретическую работу, посвященную пере-

ключению поляризационных мод излучения лазерных полупроводниковых диодов на основе твердых растворов A^3B^5 при одноосном сжатии.

Значительное число работ, представленных на секции «Квантовые точки, квантовые нити и другие низкоразмерные системы», посвящено исследованию электрических, оптических, фотоэлектрических свойств наноструктур различной размерности, а также методам и условиям их приготовления. Заслуживают внимания экспериментальные исследования фотолюминесценции нанокристаллов кремния в матрице аморфного гидrogenизированного кремния; особенностей фототока массива квантовых нитей GaAs/InGaAs со структурой ядро-оболочка; люминесценции в коллоидных квантовых точках CdSe; гетероструктур с квантовыми точками InAs/GaAs методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии; изучению прямоугольных и круговых призматических петель дислокаций несоответствия в наногетероструктурах (композитных наночастицах и радиально-неоднородных нанопроволоках типа ядро-оболочка); безызлучательной оже-рекомбинации в нанокристаллах кремния, легированных мелкими донорами; синтезу и исследованию металлических наночастиц с плазмонным резонансом в матрице арабиногалактана.

Среди представленных теоретических работ следует упомянуть исследования процесса передачи энергии от экситонов полупроводниковой квантовой нити к матрице из органических молекул; магнетизма и стабильности кластеров силицидов переходных металлов; расчет упругих напряжений, зонной диаграммы и положения основных уровней квантования электрона и тяжелой дырки в квантовых точках InAs; электронной структуры ограниченных по длине закрытых одностенных кресельных и зигзагообразных углеродных нанотрубок; работы выхода с графеновых наноструктур.

Среди экспериментальных работ следует отметить исследования фотопроводимости массивов квантовых точек Ge/Si в среднем инфракрасном диапазоне (аспи-

рант СПбГПУ Р.М. Балагула получил за них диплом 3-й степени и премию); среди теоретических – исследование краевых состояний в топологическом изоляторе висмут на кремнии (аспирант Нижегородского ГУ А.А. Чубанов, диплом 3-й степени и премия) и изучение возможности применения функционалов плотности к расчету электронной структуры и колебательных спектров молекул-оснований ДНК и РНК (студентка МГУ А.В. Виккулова, поощрительный диплом).

В докладах, представленных на секции «Приборы опто- и наноэлектроники», отражен широкий спектр прикладных исследований. С точки зрения практического применения наиболее значимыми представляются работы по исследованию приборных структур на основе широкозонных полупроводниковых нитридов третьей группы периодической системы Д.И. Менделеева. Исследованы фотодетекторы на твердых растворах AlGaIn с резким длинноволновым краем чувствительности в заданной области ультрафиолета, в том числе нечувствительные к солнечному свету (солнечнослепые и видимослепые фотоприемники). Представлены результаты численного моделирования светодиодных структур на основе GaN/InGaIn. Экспериментальная работа аспиранта Академического университета (Санкт-Петербург) А.В. Бабишева, посвященная исследованию возможности использования графена в качестве прозрачного контакта к поверхности массива GaN-пирамид в светодиодных структурах, рекомендована для участия в конкурсе по Программе «УМНИК». Исследованные в работе структуры демонстрируют электролюминесценцию в длинноволновой области видимого спектра и, в сочетании с множественными квантовыми ямами InGaIn/GaN, перспективны для создания источников белого света нового поколения.

Ряд работ посвящен проблеме преобразования солнечной энергии. На предыдущих конференциях при решении проблем ее фотоэлектрического преобразования основное внимание было сконцентрировано на многокаскадных преобразователях,



представляющих комбинацию резких гетеропереходов. На настоящей конференции обсуждался альтернативный вариант: фотоприемник с варизонной структурой. Студентом СПбГЭТУ А.Н. Свистуновым разработана технология получения слоев твердых растворов на основе GaSb с изменяющейся по толщине шириной запрещенной зоны, отмечено увеличение напряжения холостого хода за счет градиента ширины запрещенной зоны. Важное практическое значение имеют также разработки полупрозрачных солнечных модулей на основе аморфного и микрокристаллического кремния, представленные на конференции аспирантом Г.М. Аблаевым из Академического университета (Санкт-Петербург). Безусловный практический интерес представляют разработки фотоприемников лазерного излучения на основе гетероструктур InGaAsP/InP для беспроводной передачи электроэнергии (аспирант СПбГЭТУ А.Е. Маричев) и малоинерционного пироэлектрического приемника субмиллиметрового диапазона. Кроме того, на конференции обсуждались разработки датчиков разнообразных физических величин и газочувствительных сенсоров. Доклад студентки СПбГПУ Е.Д. Карпенко был посвящен исследованиям волноводных свойств стекол с наночастицами серебра на поверхности. Эти исследования нацелены на создание биосенсоров.

Указанные работы участников конференции А.Н. Свистунова, Г.М. Аблаева, А.Е. Маричева и Е.Д. Карпенко рекомендованы Программным комитетом для участия в конкурсе по Программе «УМНИК».

На секции «Новые материалы» в основном представлены работы, посвященные исследованию органических, полимерных и композиционных материалов с нано- и микровключениями: изучению характеристик переключений на микромасштабах в образцах с резистивной памятью на базе полимерных и композитных материалов; исследованию оптических свойств металлополупроводниковых метаматериалов на основе матрицы AlGaAs с хаотическими и упорядоченными массивами нановключений As и Sb; разработке резистивных ма-

териалов для создания новых элементов фазовой памяти в системах ионных стеклообразных проводников Cu-Ag-Ge-As-Se; методов создания нанокompозитных материалов на основе фуллеренсодержащих молекулярных комплексов C_{60} -CdTe, C_{60} -CdS для преобразователей солнечной энергии. Большой интерес вызвали результаты исследований формирования гексагональной структурной модификации кремния на сапфире.

Проблематика проектов, доклады по которым представлены на конференции, соответствует перечню актуальных проблем современной физики полупроводников и поддержана различными фондами и программами. В частности, 14 работ поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований, 8 работ – Министерством образования и науки РФ, в том числе 2 – в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Ряд участников конференции получили финансовую поддержку за счет других фондов, правительственных и ведомственных программ (8 работ), 4 работы выполнены в рамках программ по международному сотрудничеству.

Следует отметить высокий уровень докладов и подчеркнуть, что многие лучшие доклады явились результатом совместных исследований представителей вузов и Российской академии наук. Участники конференции констатируют важность проведения научной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике для студентов и аспирантов как с точки зрения представления и обсуждения научных результатов, так и с точки зрения установления научных контактов и организации совместных научных исследований.

Очередную Всероссийскую молодежную конференцию по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике предполагается провести в г. Санкт-Петербурге в октябре-ноябре 2014 г. Соответствующая информация будет размещена на сайте www.semicond.spbstu.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 15-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике: Тезисы докладов. 25–29 ноября 2013 года. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 96 с.

2. 15-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике: Программа конференции. 25–29 ноября 2013 года. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 12 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВА Мария Александровна – старший научный сотрудник, заместитель заведующего кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vilyin@rphf.spbstu.ru

ГАВРИКОВА Татьяна Андреевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
zykov@rphf.spbstu.ru

ЗЫКОВ Валерий Андреевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
zykov@rphf.spbstu.ru

ИЛЬИН Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vilyin@rphf.spbstu.ru

ШАЛЫГИН Вадим Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
zykov@rphf.spbstu.ru

Vasil'eva M.A., Gavricova T.A., Zykov V.A., Ilyin V.I., Shalygin V.A.
ACTUAL DIRECTIONS OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND NANOSTRUCTURES, SEMICONDUCTOR NANO- AND OPTOELECTRONICS
(on the 15th All Russian Youth Conference).

Short review of results of the conference is done. The works, recommended to practical using, are mentioned.

SEMICONDUCTOR PHYSICS, NANOELECTRONICS, OPTOELECTRONICS, CONFERENCE.

REFERENCES

1. The 15th All-Russian Youth Conference on Semiconductor and Nanostructure Physics and Semiconductor Opto- and Nanoelectronics: Conference Paper Summaries. St. Petersburg,

Polytechnical University Publishing House, 2013. 96 p. (rus)

2. The 15th All-Russian Youth Conference on Semiconductor and Nanostructure Physics



and Semiconductor Opto- and Nanoelectronics: Polytechnical University Publishing House, 2013.
Conference Programme. St. Petersburg, 12 p. (rus)

THE AUTHORS

VASIL'EVA Maria A.

St. Petersburg State Polytechnical University.
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
vilyin@rphf.spbstu.ru

GAVRICOVA Tatiana A.

St. Petersburg State Polytechnical University.
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

ZYKOV Valery A.

St. Petersburg State Polytechnical University.
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
zykov@rphf.spbstu.ru

ILYIN Vladimir I.

St. Petersburg State Polytechnical University.
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
vilyin@rphf.spbstu.ru

SHALYGIN Vadim A.

St. Petersburg State Polytechnical University.
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
zykov@rphf.spbstu.ru