

На правах рукописи

БАБИЧЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ВЛИЯНИЕ ИНТЕРФЕЙСОВ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  
CVD-ГРАФЕНА НА ТРАНСПОРТ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

**Научный руководитель:** **Бутко Владимир Юрьевич**, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

**Официальные оппоненты:** **Вывенко Олег Федорович**, д. ф.-м. н., профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербургского государственного университета

**Тарасов Сергей Анатольевич**, к. ф.-м. н., доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ) им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт Российской академии наук**

Защита состоится **15 мая 2014 г. в 15 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.205.01 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан 9 апреля 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.205.01

канд. физ.-мат. наук



Петров А. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Органическая электроника имеет ряд преимуществ над традиционной полупроводниковой технологией, основными из которых являются: гибкость, малая себестоимость, прозрачность. Быстрое развитие технологий, в том числе электронной литографии в конце 20 века послужило основанием к формированию нового научного направления, посвященного графену. Данное направление получило развитие после работы А. Гейма и К. Новоселова [1]. Присуждение Нобелевской премии в 2010 году стало мощным импульсом к развитию практических областей применений.

К настоящему моменту, продемонстрировано создание графеновых высокочастотных транзисторов как на гибких подложках (с частотой отсечки,  $f_t$ , порядка 25 ГГц [2]), так и на планарных подложках (достигнуты значения  $f_t$  в 427 ГГц и 350 ГГц для транзисторов на основе графена, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод) [3] и термического разложения карбида кремния [4], соответственно), создание фотодетекторов с чувствительностью порядка 50 мА/Вт для телекоммуникаций [5]. Несмотря на тот факт, что чувствительность сопоставима с характеристиками кремниевых и германиевых фотодетекторов [6] в данной области длин волн, данные результаты представлены на графене, полученном методом отшелушивания, который непригоден для практических применений (типичный размер чешуек не более миллиметра, беспорядочно разбросанных на поверхности подложки).

CVD технология синтеза графена является перспективным методом роста для практических применений. Главными преимуществами данной техники роста являются: большая площадь получаемых образцов (продемонстрированы листы графена с диагональю свыше 30 дюймов [7], и длиной свыше 100 метров [8]), высокая скорость роста, малая себестоимость и возможность роста графена с различным числом слоев (далее по изложению будут использованы два термина: монослойный графен, и 4-слойный графен (от 3 до 5 монослоев, в зависимости от положения точки измерения)). Несмотря на множество плюсов CVD метода роста, имеется один существенный недостаток – поликристаллическая структура выращенного данной методикой графена. К настоящему моменту продемонстрирована возможность синтеза CVD-графена (монокристалла) с размерами доменов-зерен вплоть до 2,3 мм [9]. Однако, типичный размер зерен CVD-графена большой площади составляет от 250 нм до нескольких микрон [10].

Исследованиям по изучению вклада границ зерен в транспорт CVD-графена посвящен целый ряд работ [11-13]. Однако, в основном, рассматривается либо электрический, либо тепловой транспорт CVD-графена, причем измерения проводятся на микромасштабе. В свою очередь, изучение электрических и термоэлектрических свойств графена на макромасштабе, и сравнение с результатами на микромасштабе позволят сформировать более полную картину о влиянии поликристаллической структуры CVD-графена на транспорт носителей заряда.

К настоящему моменту, физике формирования качественного интерфейса графен/планарная подложка посвящен целый ряд работ. Основные подходы состоят в выборе подложки с высокой энергией поверхностных фононов [14], модификации поверхности [15], расположении графена на атомарно гладкой поверхности [16]. В свою очередь, данные подходы имеют ряд ограничений при использовании CVD-графена в оптоэлектронике, когда требуется переносить графен на гетероструктуру с заданным контактным слоем. Исследованию формирования интерфейса графен/планарная  $A_3B_5$  гетероструктура, где графен используется в качестве прозрачного проводящего контакта посвящен целый ряд работ. В основном они сосредоточены на изучении качества интерфейса графен/GaN и графен/GaAs. В свою очередь, за последние годы развиваются альтернативные классы соединений, в числе которых разбавленные твердые растворы GaPNAs, перспективные с точки зрения интеграции с кремнием. Помимо новых классов планарных гетероструктур, для которых до настоящего момента не продемонстрировано интеграции с графеном, в последнее время большой интерес прикован к использованию геометрии вискеро́в, пирамид, фотонных кристаллов для создания принципиально новых устройств оптоэлектроники с структурированной поверхностью. Исследование возможности формирования интерфейса графен/сильно структурированная поверхность также находятся на начальном этапе. Помимо практической цели, формирование данного интерфейса представляет интерес с фундаментальной точки зрения. Расположение графена на сильно структурированной поверхности может приводить к разупорядочению в графене, изменениям его зонной структуры за счет локальных деформаций, частичного подвешивания графена, особенностей взаимодействия графена с подложкой, имеющей характерный период (образованием радиальной сверхрешетки). Данные изменения зонной структуры могут приводить к изменениям свойств графена, таких как проводимость, прозрачность, теплопроводность. Об изменении зонной структуры графена за счет локальных деформаций (возникновение псевдо магнитных полей с амплитудой свыше 300 Тл) сообщалось

ранее [17]. Расположение графена на инверсионных сферах золота [18] приводит к изменению неупругого рассеяния света (сдвиг пиков Рамановских спектров).

На текущий момент, контактные свойства к CVD-графену исследовались при локализации графена на планарных подложках и при типичной ширине канала порядка 10 мкм, что обусловлено применениями графена для создания высокочастотных транзисторов. В свою очередь, использование графена в качестве прозрачного контакта при создании устройств оптоэлектроники связано с формированием графеновых мез с характерными размерами в сотни микрон. На столь больших размерах число границ зерен многократно возрастает, приводя к протеканию тока через доменную сеть. Наличие большого числа границ зерен может отразиться как на величине плоскостного сопротивления графена, так и на контактном сопротивлении металлов к графену, но ранее не исследовался. Более того, экспериментальные работы, представленные в литературе, посвящены изучению контактных свойств металлов к графену при его расположении на поверхности SiO<sub>2</sub>. Результаты по контактным свойствам к графену при его расположении на поверхности A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> гетероструктур не освещены вовсе, несмотря на ряд публикаций по формированию светодиодных и фотодетекторных гетероструктур с графеновым контактом.

Изучение контактных свойств к графену при его расположении на сильно структурированных поверхностях сопряжено с сложностью изготовления тестовых непроводящих структур на основе вискеро́в, пирамид. Типичное остаточное легирование GaN вискеро́в, пирамид составляет порядка  $(0,5 \div 1,0) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , в ZnO вискерах легирование еще выше, что приводит к паразитному каналу протекания тока графен/вискеры/подложка/вискеры/графен, как следствие, ошибкам при вычислении контактного и плоскостного сопротивления графена. Нанесение диэлектрических слоев не является эффективным методом электрической изоляции вискеро́в, пирамид для изучения воздействия сильно структурированной подложки на контактные свойства к графену и его плоскостное сопротивление (вследствие разброса по высоте вискеро́в, пирамид, наличия дефектов в диэлектрическом слое, по которым образуются проводящие каналы утечки тока). В свою очередь, исследование воздействия сильно структурированного интерфейса на величину контактного сопротивления и проводимость графена возможно за счет расположения графена на модельном объекте – массиве диэлектрических сфер опала (сферы SiO<sub>2</sub>).

Суммируя вышесказанное, работа направлена на изучение влияния поликристаллической структуры CVD-графена на электрический и термоэлектрический транспорт носителей заряда,

на контактные свойства металлов к графену на миллиметровом масштабе, изучение влияния взаимодействия графена с подложкой (исследования интерфейса графен/подложка), структурированности подложки на сопротивление графена и контактные свойства металлов к графену. Полученные данные о вкладе границ зерен графена, влиянии интерфейса графен/подложка на транспорт носителей заряда были в дальнейшем использованы при создании светодиодных и фотодетекторных структур с графеновым прозрачным контактом и изучении их оптических свойств с целью повышения рабочих характеристик.

Вышеизложенное свидетельствует об **актуальности и практической значимости проводимых исследований.**

Работа в рамках диссертации поддержана рядом проектов, в том числе:

Collaborative European Project (FP7). EU-RU.NET (2010-2012 гг.), FP7 – Maria Curie Actions – People – Funprobe (2012-2014 гг.), РФФИ № 10-02-00853 А. (2010-2012 гг.), проект РФФИ № 09-02-01444 А (2009-2011 гг.), проект СПбНЦ РАН за 2010 и 2011 года, проект Президиума РАН (2012-2014 гг.), грант Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук (2012-2013 гг.), РФФИ № 14-02-01212 А (2014-2016 гг.), а также персональный грант Правительства Санкт-Петербурга для студентов и аспирантов в 2011, в 2012 годах, персональный грант компании ОПТЕК (2013 г), проект РФФИ № 14-02-31485 мол\_а (2014-2015 гг., руководитель проекта).

**Основные цели** диссертационной работы:

1. Исследование вклада границ зерен (поликристаллической структуры CVD-графена) в транспорт носителей заряда и контактные свойства металлов к графену на миллиметровом масштабе.
2. Исследование влияния интерфейсов на транспорт носителей заряда и контактные свойства к графену на миллиметровом масштабе для оптических применений.
3. Формирование и исследование оптических свойств новых классов гетероструктур с графеновым прозрачным контактом.

**Задачи**, на решение которых направлена диссертационная работа:

1. Сравнительное исследование температурных зависимостей коэффициента термоэдс и сопротивления в графене с различным числом слоев.
2. Исследование контактных свойств и проводимости графена на планарных подложках.
3. Исследование возможности интеграции планарных светодиодных гетероструктур на основе разбавленных твердых растворов GaPNAs с прозрачным графеновым контактом.

4. Исследование сильно структурированного интерфейса (графен/массив пирамид, графен/массив вискеро́в, графен/массив сфер опала) с помощью электронной микроскопии сверхвысокого разрешения.

5. Исследование контактных свойств и проводимости графена на сильно структурированной поверхности сфер опала.

6. Оценка энергии адгезии графена к сильно структурированной поверхности (массиву GaN вискеро́в).

7. Измерение и анализ спектров электролюминесценции, спектров фототока гетероструктур с графеновым контактом для оптоэлектронных применений.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в получении новой информации о вкладе зерен CVD-графена в транспорт носителей заряда на различных масштабах, величине контактного сопротивления ряда металлов к графену на миллиметровом масштабе для применений графена в качестве прозрачного контакта к светодиодным и фотодетекторным гетероструктурам, влиянии структурированного интерфейса на сопротивление графена и контактные свойства металлов к графену, энергии адгезии графена к сильно структурированной поверхности, возможности интеграции графена и ряда перспективных классов гетероструктур для создания приборов оптоэлектроники на их основе.

**Научная значимость** диссертационной работы состоит в исследовании влияния поликристаллической структуры CVD-графена на транспорт носителей заряда, контактные свойства металлов к графену, изучении формирования интерфейсов между графеном и подложкой, в том числе сильно структурированных интерфейсов и их влияния на проводимость графена, контактные свойства металлов к графену, энергию адгезии между графеном и сильно структурированной поверхностью подложки.

**Практическая значимость.** В работе впервые представлены результаты по созданию перспективных планарных гетероструктур (на основе GaPNAs) и гетероструктур с сильно структурированной поверхностью (на основе GaN, ZnO) с графеновым прозрачным контактом. Использование графена улучшило характеристики светодиодных и фотодетекторных гетероструктур, что позволяет говорить о перспективности применения графена в качестве альтернативы прозрачному индий-оловянному оксиду при создании устройств оптоэлектроники.

**Объекты и методы исследования.** Основным объектом исследования работы является поликристаллический CVD-графен с различным числом слоев (монослойный графен,

выращенный на медной фольге, 4-слойный графен, выращенный на поверхности никеля). Методами исследования являются: сканирующая электронная микроскопия сверхвысокого разрешения для анализа качества сформированного интерфейса, измерение сопротивления (4-зондовая методика) и коэффициента термоэдс (дифференциальный метод) при различных температурах, измерение вольт-амперных характеристик двухзондовой методикой, измерение спектров фотолюминесценции, электролюминесценции, спектральной зависимости фототока.

По результатам работы на защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Продемонстрирован рост сопротивления,  $\rho$ , 4-слойного графена с понижением температуры,  $T$ , от 300 К до 77 К (слабая полупроводниковая зависимость  $\rho(T)$ ), определяемый рассеянием носителей заряда на границах зерен и взаимодействием зерен, расположенных в разных слоях графена. Зависимость  $\rho(T)$  монослойного графена демонстрирует слабый металлический ход, определяемый рассеянием на границах зерен.

2. Корреляции между величиной работы выхода металла (Au, Pt, Ag, Cr, Ni, Ti) и значением контактного сопротивления не наблюдается.

3. Интеграция графена в качестве прозрачного контакта к GaPNAs светодиодным гетероструктурам увеличивает растекание носителей заряда (составляет порядка 300–400 мкм).

4. Перенос графена на структурированные поверхности (сферы опала  $\text{SiO}_2$ ) приводит к росту сопротивления графена в сравнении со случаем расположения на планарной поверхности  $\text{SiO}_2$ . Энергия адгезии графена к сильно структурированной поверхности составляет  $0,3 \div 0,7$  Дж/м<sup>2</sup> и сопоставима с результатами для графена, локализованного на планарной подложке.

5. Интеграция графена к сильно структурированным поверхностям (массив GaN, ZnO вискером, GaN пирамид) сужает спектр электролюминесценции светодиодных GaN гетероструктур и повышает чувствительность фотодетекторных структур на основе ZnO, GaN в ультрафиолетовой области спектра в сравнении со случаем применения индий-оловянного оксида в качестве прозрачного контакта.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертационной работе, определяется использованием надежных экспериментальных методик, позволяющих проводить измерения с высокой точностью, использованием современных средств анализа экспериментальных данных, измерительных приборов, которые проходят калибровку.

**Способы получения исследуемых образцов:**

В работе исследовались образцы графена, синтезированные методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод), планарные структуры GaPNAs, а также GaN вискеры, выращенные с помощью МВЕ методики роста (молекулярно-пучковая эпитаксия с азотным плазменным источником), ZnO вискеры, выращенные с помощью ECD техники (электрохимическое осаждение).

**Техники измерений включают:** сканирующую электронную микроскопию сверхвысокого разрешения для анализа качества сформированного интерфейса, измерение сопротивления (4-х зондовая методика) и коэффициента термоэдс (дифференциальный метод) при различных температурах, измерение вольт-амперных характеристик двухзондовой методикой, измерение спектров фотолюминесценции, электролюминесценции, спектральной зависимости фототока.

**Апробация работы:** основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях: Международной конференции “Advanced carbon nanostructures” (С.-Петербург, 2011), V, VI, VII Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (С.-Петербург, 2011, 2012, 2013), II, III, Международной конференции молодых ученых «Физика низких температур» (Харьков, 2011, 2012), 11th International conference on Atomically Controlled surfaces, Interfaces and Nanostructures (С.-Петербург, 2011), 8th Advanced Research Workshop “Fundamentals of Electronic Nanosystems”, NanoPeter 2012 (С.-Петербург, 2012), XXXVI Сессии по физике низких температур (С.-Петербург, 2012), II Международной школе по физике поверхности “Technologies and Measurements on Atomic Scale” (Сочи, 2012), 5th plenary workshop of the French GDR “Semiconductor Nanowires” (Saint-Martin-de-Londres, 2013), Международной конференции “Advanced Carbon Nanostructures”(С.-Петербург, 2013), XV Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, 2013), а также на лабораторных семинарах в ФТИ им. А. Ф. Иоффе, СПб АУ НОЦНТ РАН, Institut d’Electronique Fondamentale, Orsay cedex, France и в Forschungszentrum Juelich., Juelich, Germany.

По теме диссертации опубликована 21 работа, из них 6 статей в рецензируемых журналах. Список основных работ автора приведен в конце автореферата.

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Описанные в

диссертации экспериментальные исследования проводились совместно с соавторами, обработка экспериментальных данных проведена автором. Вклад автора является определяющим при написании статей, раскрывающих содержание работы.

**Структура и объем диссертации:** диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка работ автора по теме диссертации и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 107 страниц, включая 52 рисунка и 3 таблицы. Список литературы включает 203 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** отражает актуальность проводимых в рамках диссертационной работы исследований, в нем сформулированы основные цели диссертации, охарактеризованы научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, даны сведения о достоверности полученных результатов, об апробации работы, а также о структуре и объеме диссертации.

В **§1.1** представлены особенности методики роста 4-слойного и монослойного CVD-графена, а также особенности процесса переноса графена. В **§1.2** приведены результаты по исследованию электрического и термоэлектрического транспорта CVD-графена. Температурные зависимости сопротивления и термоэдс CVD-графена с различным числом слоев измерены в диапазоне температур 77÷300 К. Отметим, что измерения коэффициента термоэдс,  $S$ , CVD-графена в заданном диапазоне температур произведены впервые.

4-слойный CVD-графен демонстрирует рост сопротивления,  $\rho$ , и падение термоэдс,  $S$ , с понижением температуры при измерении на одном и том же образце (см. рисунок 1). Высказано предположение, что ход  $\rho(T)$  обусловлен рассеянием на границах зерен поликристаллического CVD-графена, а также взаимодействием разориентированных доменов-зерен, расположенных в разных слоях графена [19]. Данное предположение согласуется с ходом зависимости  $S(T)$ . Типичные значения  $S$  при  $T=300$  К составили 11 мкВ/К.

Для монослойного CVD-графена при расстоянии между потенциальными контактами в 2 мм наблюдается слабая температурная зависимость сопротивления,  $R(T)$  (изменение абсолютной величины сопротивления менее 1 % в исследованном диапазоне температур), обусловленная рассеянием носителей заряда на большом числе границ зерен. Разориентация доменов-зерен в плоскости образца также наблюдается для монослойного графена [20]. В свою очередь, отсутствие взаимодействия между разориентированными зернами, расположенными в разных слоях может служить причиной изменения наклона зависимости  $R(T)$  с уменьшением

числа слоев графена (с четырех до одного монослоя). При измерении сопротивления монослойного графена на расстоянии в 1,5-2 мкм наблюдается падение сопротивления с понижением температуры, с отклонением от линейности в области низких температур.

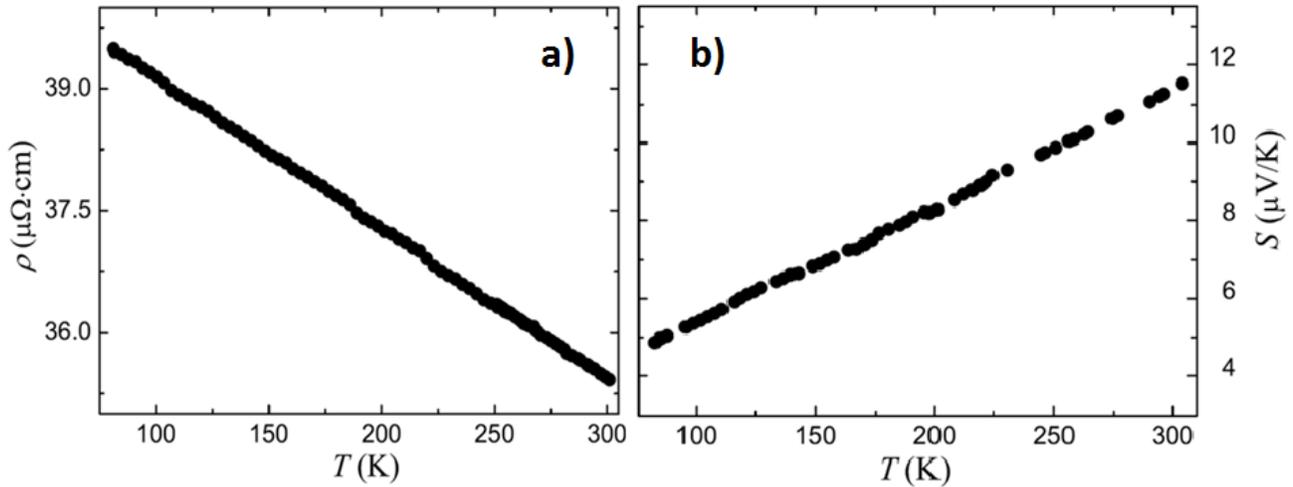


Рисунок 1. Температурные зависимости сопротивления а) и коэффициента термоэдс б) 4-слойного графена.

Падение сопротивления составляет 8% при понижении температуры с 300 К до 77 К. На микрометровом масштабе проявляются особенности, связанные с транспортом, обусловленным, главным образом, через графен, а не через границы поликристаллических зерен графена (см. рисунок 2).

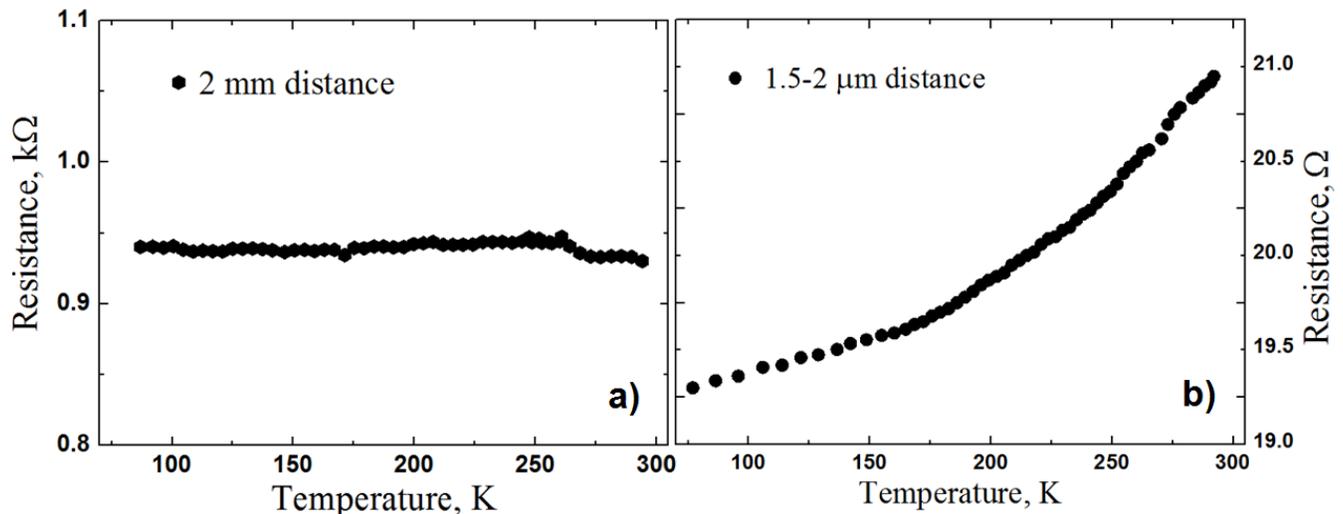


Рисунок 2. Температурные зависимости сопротивления монослойного графена, измеренные 4-х зондовым методом. а) расстояние между потенциальными контактами составляет 2 мм; б) расстояние между потенциальными контактами составляет 1,5-2 мкм.

Зависимость  $S(T)$  монослойного графена при измерениях на миллиметровом масштабе демонстрирует линейный ход. Абсолютная величина  $S$  при  $T=300$  К составляет 53 мкВ/К. При понижении температуры с 300 К до 77 К коэффициент термоэдс падает на 81%. Отметим, для 4-слойного графена наблюдается более слабая зависимость  $S(T)$  (падение порядка 58%). Сравнение измеренной зависимости  $S(T)$  монослойного CVD-графена с аналогичными данными для графена, полученного методом отшелушивания позволяет заключить, что монослойный CVD-графен после процесса роста имеет высокий уровень легирования (концентрация носителей заряда составляет  $(1,4 \div 1,8) \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), соответствующий дырочному типу проводимости.

В работе проведен численный расчет зависимости  $S(T)$  для выявления превалирующего механизма рассеяния носителей заряда в монослойном графене при термоэлектрическом транспорте. Расчет производился на основе решения уравнения Больцмана в приближении времени релаксации, с учетом энергетического закона дисперсии в графене и рассмотрения общей статистики (в основном, в литературе используется подход, основанный на приближении Зоммерфельда для вырожденного газа, который применим в области температур менее 200 К и для высокой концентрации носителей заряда). Показано, что линейный тип  $S(T)$  может быть описан при учете рассеяния на атомах примеси или точечных дефектах. Учет фононного вклада приводит к нелинейности  $S(T)$ .

**Вторая глава** посвящена исследованию контактных свойств металлов на миллиметровом масштабе к CVD-графену. Применения в оптоэлектронике, где графен используется в качестве прозрачного проводящего контакта большой площади требуют формирования графеновых мез с характерными размерами в сотни микрон. В §2.1 представлены результаты для графена, локализованного на планарных непроводящих подложках (Si/SiO<sub>2</sub>, GaAs, предметное стекло). Перенос графена на поверхность сформированных контактов позволил минимизировать рассеяние носителей заряда, обусловленное наличием остатков фоторезиста/электронного резиста на интерфейсе между графеном и напыляемым металлом. Наименьшее достигнутое значение контактного сопротивления, умноженного на ширину контактных площадок,  $R_c \cdot W$ , для монослойного графена составило 8 кОм·мкм (соответствует случаю графена, локализованного на предметном стекле с золотом в качестве верхнего контактного слоя), для 4-слойного графена – 2.7 кОм·мкм (соответствует случаю графена, локализованного на Si/SiO<sub>2</sub> с никелем или хромом в качестве верхнего контактного слоя). Большие значения контактного сопротивления,

полученные в данной работе обусловлены миллиметровой шириной канала и слабым связыванием между графеном и металлом в случае расположения графена на сформированных металлических контактных площадках. Корреляции между работой выхода металла и величиной контактного сопротивления не наблюдается (работы выхода исследуемых металлов Ag, Pt, Cr, Au, Ti, Ni равны 4.3, 5.64, 4.48, 4.83, 4.08, 5.32 эВ, соответственно), что согласуется с литературными данными, представленными ранее для узких графеновых каналов с шириной менее 10 мкм [21-23]. Изменение наклона зависимости сопротивления 4-слойного графена от расстояния между контактными площадками при расположении графена на поверхности Si/SiO<sub>2</sub> может быть обусловлено частичным подвешиванием графена на малом расстоянии между контактными площадками.

Минимальное плоскостное сопротивление,  $R_{sh}$ , 4-слойного графена, составляет 0,22 кОм/□ (соответствует случаю графена, локализованного на подложке GaAs с хромом или титаном в качестве верхнего контактного слоя), аналогичная величина для монослойного графена составляет 1,4 кОм/□ (соответствует случаю графена, локализованного на Si/SiO<sub>2</sub> с золотом в качестве верхнего контактного слоя). Типичная величина подвижности носителей заряда,  $\mu$ , монослойного CVD-графена при расположении на поверхности Si/SiO<sub>2</sub> составляет  $2,8 \times 10^3$  см<sup>2</sup>/(В·с) для случая золотого верхнего контактного слоя. Транспорт носителей заряда в данном случае имеет диффузионный характер с характерной величиной длины свободного пробега порядка 44 нм.

Проведено исследование воздействия структурированной подложки на свойства графена. Исследования по формированию интерфейса графен/массив сфер опала (сфер SiO<sub>2</sub> с типичным диаметром порядка 230 нм), характеристики качества сформированного интерфейса с помощью сканирующей электронной микроскопии сверхвысокого разрешения (СЭМ), изучению контактных свойств металлов к 4-слойному графену, расположенному на сильно структурированной поверхности представлены в §2.2. С помощью СЭМ показано, что 4-слойный графен повторяет профиль сфер опала. Продемонстрирован значительный рост контактного сопротивления,  $R_c \cdot W$ , порядка 75%, с повышением температуры с 77 К до 298 К. Абсолютная величина  $R_c \cdot W$  при 298 К составляет 9,5 кОм·мкм и сопоставима с результатами для 4-слойного графена, локализованного на планарной поверхности SiO<sub>2</sub> ( $R_c \cdot W = 10$  кОм·мкм). Продемонстрировано падение плоскостного сопротивления  $R_{sh}$  на 19 % с понижением температуры с 300 К до 77 К. Абсолютное значение  $R_{sh}$  при комнатной температуре составляет 1,18 кОм/□ и в 3,2 раза превышает значение, полученное для 4-слойного CVD-графена,

локализованного на планарной поверхности оксида кремния (золото в качестве верхнего контактного слоя).

**Третья глава** посвящена изучению формирования интерфейса между графеном и светодиодными гетероструктурами с планарной и сильно структурированной поверхностью, где графен используется в качестве прозрачного проводящего слоя, увеличивающего растекание тока по поверхности гетероструктуры и изучению их оптических свойств.

В **§3.1** представлены результаты по исследованию интеграции графена и гетероструктур на основе разбавленных твердых растворов GaPNAs. Данный класс твердых растворов является прямозонным материалом с двумя подзонами проводимости и перспективен с точки зрения интеграции с кремнием. Показана возможность использования графена в качестве прозрачного р-контакта к планарному GaP при создании светодиодных наногетероструктур  $\text{GaP}_x\text{N}_y\text{As}_{1-x-y}$ . Использование CVD-графена позволило существенно увеличить дистанцию растекания носителей заряда от края токопроводящей площадки. Оценочная дистанция растекания носителей заряда от края токопроводящей площадки составляет 300–400 мкм. Исследованные образцы продемонстрировали повышенную стабильность длины волны излучения при увеличении тока накачки и температуры.

Стоит также отметить, что за счет изменения активной области гетероструктуры (вставки слоев GaPNAs с различной шириной запрещенной зоны в диапазоне 1,67-1,95 эВ.) и активации трех видов переходов (межподзонные и межзонные переходы) возможно реализовать излучение в необычайно широком спектральном диапазоне, от 350 до 1050 нм, что впервые продемонстрировано в рамках данной работы.

**§3.2** посвящен исследованию формирования интерфейса графен/массива GaN пирамид, изучению их оптических свойств, проведению исследований токопереноса через графеновый контакт к одиночным GaN вискерам (core-shell структура), где графен используется в качестве прозрачного контакта. Использование индий-оловянного оксида (ИТО) в качестве прозрачного контакта к массиву GaN пирамид может приводить к уширению спектров ЭЛ и сдвигу максимума интенсивности в коротковолновую область с ростом токов накачки, вследствие активации квантовых ям (InGaN состава) с различным содержанием индия, расположенных на различном расстоянии относительно вершины пирамиды (слой ИТО покрывает всю поверхность пирамид).

В ходе работы были оптимизированы условия переноса графена для формирования «точечных» контактов к массиву GaN пирамид, достигнуто равномерное покрытие (без

разрывов и дефектов) 4-слойным графеном массива GaN пирамид (см. рисунок 3). Графен не повторяет профиль структуры на масштабе в 1 мкм, а представляет собой практически плоский лист, имеющий «точечный» контакт с каждой из вершин пирамид. Типичный диаметр точечного контакта составляет  $50\pm 60$  нм.

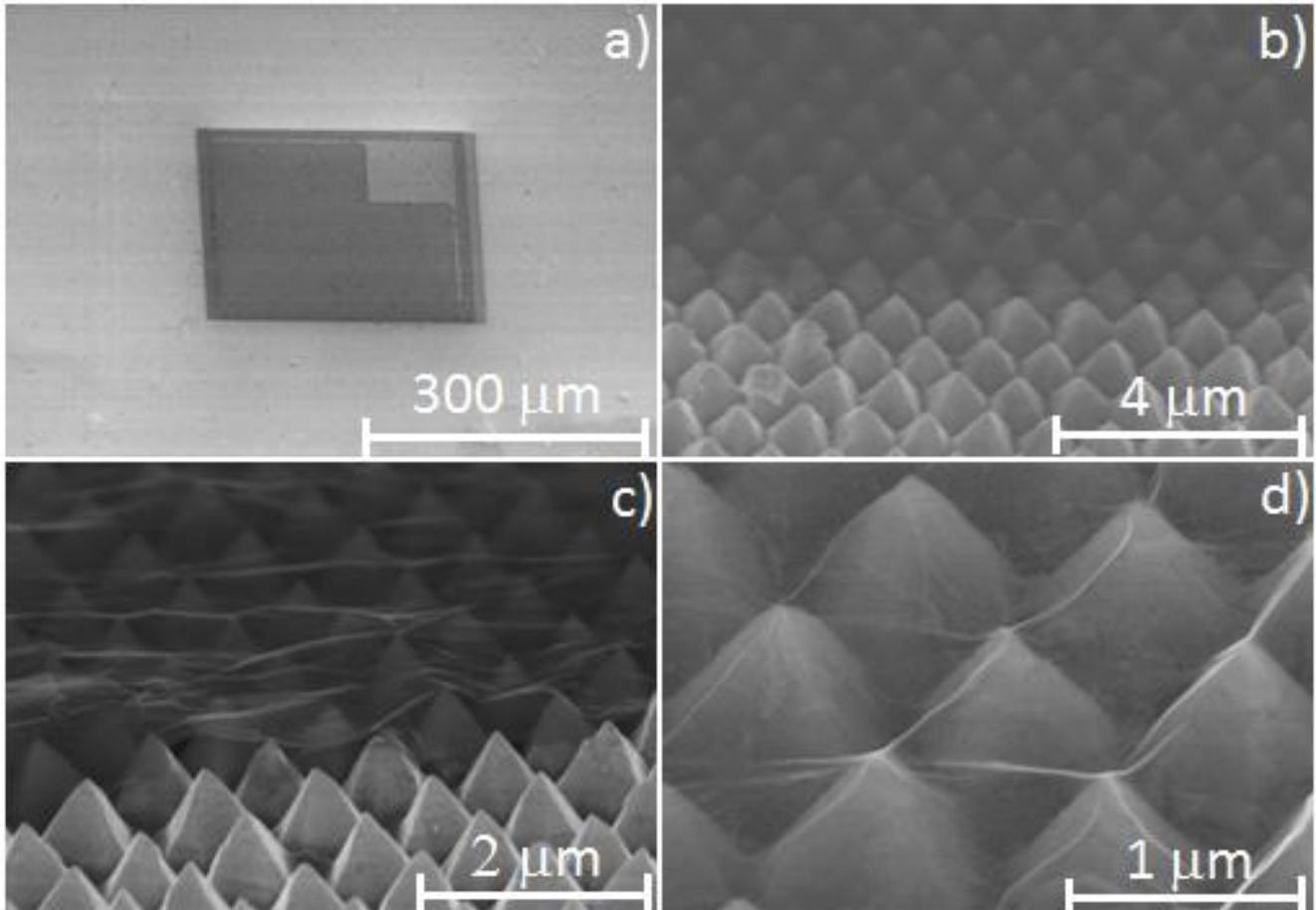


Рисунок 3. СЭМ изображение сформированной светодиодной структуры. а) общий вид мезы с размерами  $300\times 300$  мкм<sup>2</sup>; б) вид границы мезы (верхняя часть покрыта графеном, нижняя – область вне графеновой мезы); в) вид границы мезы с большим увеличением (верхняя часть покрыта графеном, нижняя – область вне графеновой мезы); д) область мезы, покрытой графеном.

Структуры демонстрируют электролюминесценцию начиная с 4 В (соответствует току порядка 0,15 мА). Показано, применение графена позволило избежать уширения спектров электролюминесценции (ЭЛ). Максимальная интенсивность электролюминесценции достигнута при плотности тока порядка  $130$  А/см<sup>2</sup>. Максимум интенсивности ЭЛ соответствует длине волны в 537 нм. С ростом плотности тока вплоть до  $3500$  А/см<sup>2</sup> наблюдается сдвиг положения

максимума ЭЛ в коротковолновую область спектра до 518 нм. Предельная плотность тока, измеренная для 4-слойного CVD-графена на планарной подложке составляет  $10^8 \div 10^9$  А/см<sup>2</sup>, что позволяет говорить о возможности использования графена в качестве прозрачного «точечного» контакта даже при больших плотностях тока.

Также были разработаны условия переноса, этапы формирования (процессирования с помощью электронной литографии) прозрачного монослойного графенового контакта к одиночному GaN висцеру с площадью покрытия около 1 мкм<sup>2</sup> для исследования особенностей ЭЛ вдоль оси вискера (см. рисунок 4).

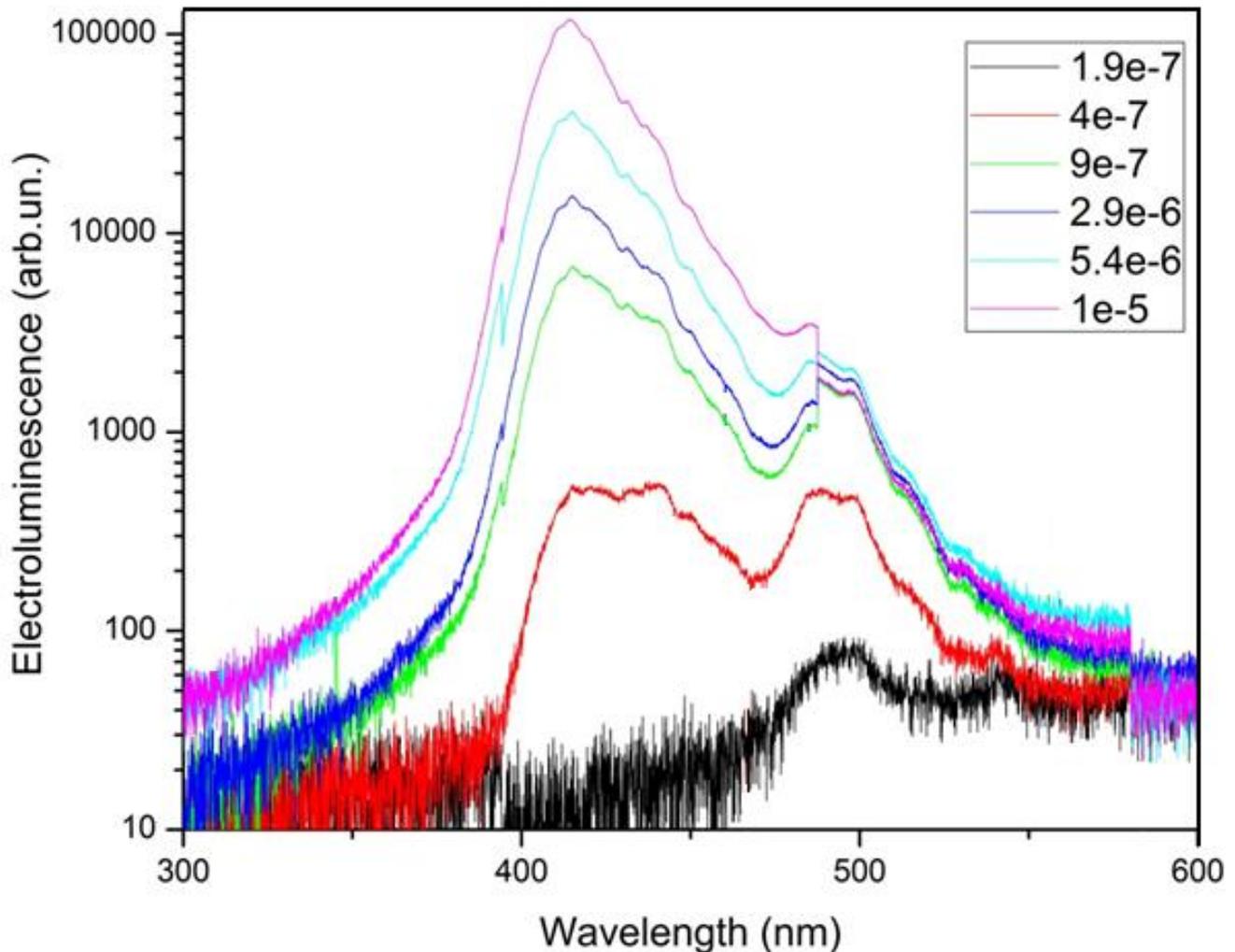


Рисунок 4. Спектры электролюминесценции одиночного core-shell GaN вискера с набором множественных InGaN квантовых ям, измеренные при комнатной температуре через прозрачный контакт на основе монослойного графена при различных токах накачки (нижний спектр соответствует току накачки в 0,19 мкА; спектры с большей интенсивностью соответствуют токам накачки в 0,4 мкА; 0,9 мкА; 2,9 мкА; 5,4 мкА; 10 мкА, соответственно).

Оценочная величина плотности тока, при электрической накачке одиночного вискера через графен составила  $6 \times 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Вольт-амперная характеристика аналогична представленной для случая точечного Ni/Au контакта. Продемонстрирована электролюминесценция при токах накачки свыше 0,16 мкА с графеновым контактом. Спектр электролюминесценции (ЭЛ) демонстрирует наличие двух пиков, связанных с различным уровнем индия в квантовых ямах вдоль оси вискера. При малых токах накачки наблюдается длинноволновая составляющая на 494 нм, что соответствует ЭЛ вблизи вершины вискера, в области, насыщенной индием. Рост тока приводит к активации квантовых ям с меньшим содержанием индия, расположенных вдали от вершины вискера и, как следствие, увеличению интенсивности ЭЛ на длине волны около 415 нм и уширению спектра ЭЛ в данной области.

Сравнение спектров ЭЛ одиночного вискера с графеновым контактом с “reference” структурой на основе одиночного вискера с тремя металлическими р-контактами, расположенными на разном удалении от вершины вискера позволяет сделать вывод, что инжекция носителей через графеновый контакт осуществляется преимущественно в области, соответствующей m-плоскости GaN вискера. Соответствие пиков ЭЛ с разной энергией различным областям люминесценции вдоль оси вискера было подтверждено с помощью катодоллюминесценции.

**Четвертая глава** отражает результаты по исследованию интерфейса графен/массив GaN вискером, графен/массив ZnO вискером и изучению оптических свойств фотодетекторов на их основе. В ходе работы были оптимизированы условия переноса графена на поверхность массива GaN вискером (§4.1). Показано, что графен равномерно покрывает поверхность вискером за исключением мест, где наблюдаются выбросы вискером по высоте (см. рисунок 5). При небольшой величине выбросов по высоте вискера (рисунок 5 d)) графен находится в подвешенном состоянии. На основании данного провисания была проведена оценка энергии адгезии графена к массиву вискером (составляет 0.3-0.7 Дж/м<sup>2</sup> и сопоставима с данными для значения энергии адгезии графена к планарной SiO<sub>2</sub> поверхности (0.31 Дж/м<sup>2</sup>) [24].

Продемонстрирована возможность использования графена для создания фотодетектора на основе массива GaN вискером за счет стандартных шагов процессирования структур. Детектор демонстрирует чувствительность 25 А/Вт при смещении в 1 В на длине волны 357 нм при малых мощностях падающего света. Спектр фототока показывает (рисунок 6 а)), что основным вкладом в фототок является отклик именно массива вискером.

Высокая прозрачность графена в ультрафиолетовой области спектра сохраняется, по крайней мере, до 298 нм. Для сравнения, индий-оловянный оксид (ИТО) демонстрирует существенное поглощение уже при длинах волн в 320 нм.

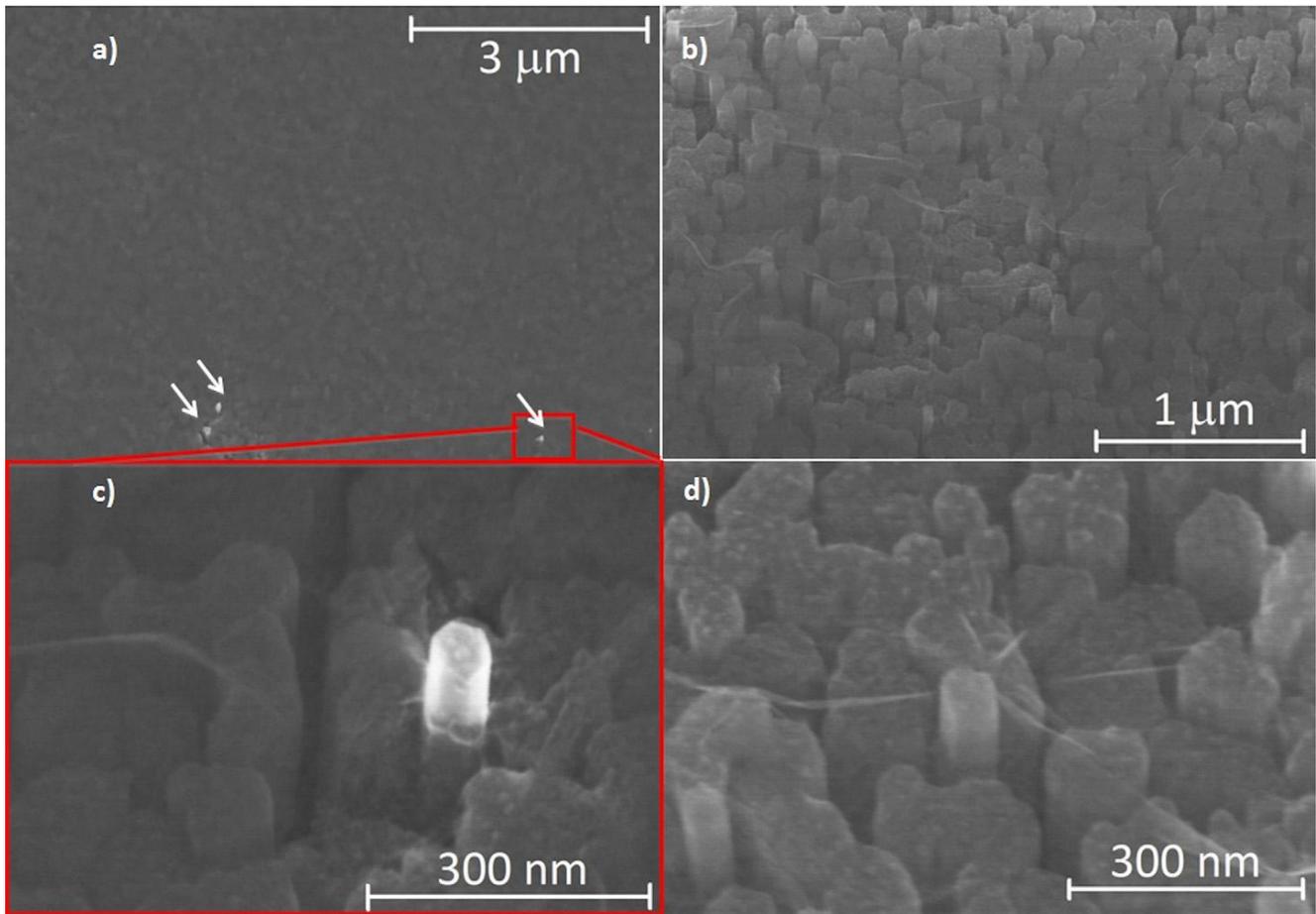


Рисунок 5. СЭМ изображения графена на поверхности массива вискероов (изображения снят под углом  $30^\circ$  по отношению к стандартной конфигурации – вид сверху). а) – изображение большой площади образца, демонстрирующие наличие нескольких точечных дефектов (отмечены белыми стрелками); б) – изображение с увеличением, демонстрирующее складки графена; в) – область дефекта, снятая с высоким пространственным разрешением; д) – область дефекта снятая с высоким пространственным разрешением и демонстрирующая провисание графена по типу вантового моста. Изображения а) (images б)-д)) получены при величине ускоряющего напряжения 5 кВ (30 кВ), соответственно.

В §4.2 приведены результаты по исследованию оптических свойств фотодетекторов на основе массива ZnO вискероов через графеновый контакт. Ранее была продемонстрирована работа фотодетектора на основе массива ZnO вискероов [25], принцип работы которого основан

на формировании барьера Шоттки между ZnO и графеном. Однако, чувствительность таких фотодетекторов составляет около 100 А/Вт. В свою очередь, реализация омического контакта, продемонстрированная в данной работе, позволила существенно увеличить чувствительность фотодетекторов на основе массива ZnO вискеро́в с графеновым контактом (составила порядка  $10^4$  А/Вт (рисунок 6 б)) в области ближнего ультрафиолета.

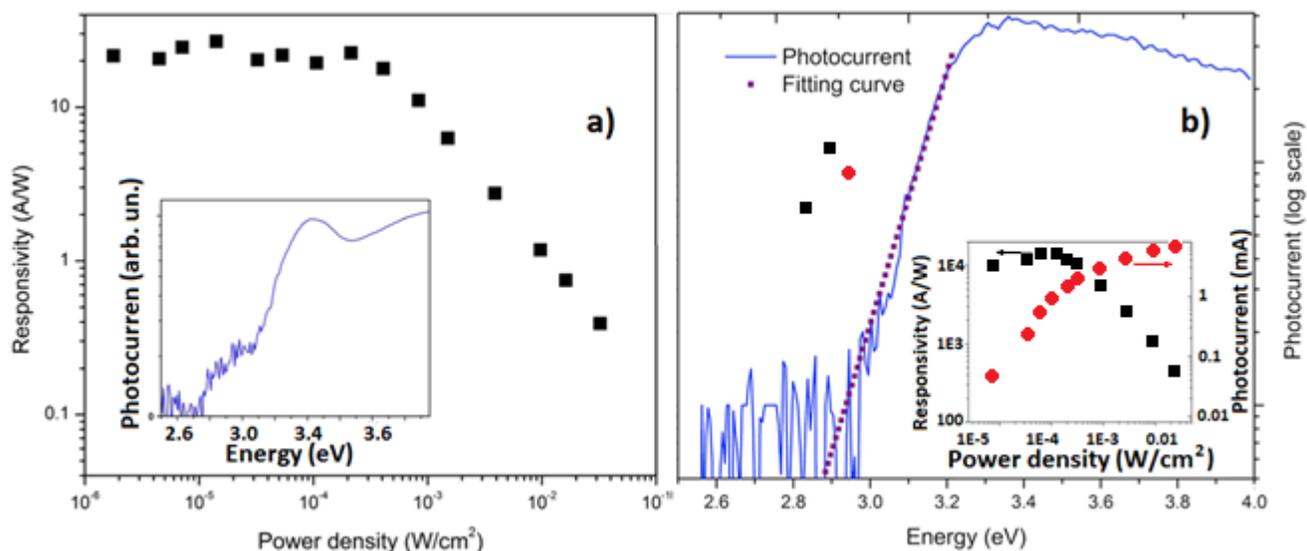


Рисунок 6. а) Зависимость чувствительности фотодетектора на основе GaN с графеновым контактом при смещении в 1 В от мощности падающего света. Вставка демонстрирует спектр фототока в логарифмическом масштабе. б) Спектр фототока фотодетектора на основе ZnO вискеро́в с графеновым прозрачным контактом. Вставка демонстрирует зависимость чувствительности фотодетектора от мощности (левая ось ординат), зависимость фототока от мощности (правая ось ординат).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе проведено исследование вклада границ в электрический и термоэлектрический транспорт CVD-графена, имеющего поликристаллическую структуру, интерфейсов (планарного и сильно структурированного) в электрический транспорт и контактные свойства металлов к графену на миллиметровом масштабе для оптоэлектронных применений. Продемонстрированы результаты по успешной интеграции графена в качестве прозрачного проводящего контакта к планарным и сильно структурированным светодиодным и фотодетекторным гетероструктурам, что позволило, в ряде случаев, повысить рабочие характеристики устройств оптоэлектроники на их основе.

В соответствии с целями диссертационной работы получены следующие **основные результаты**:

1. Продемонстрирован рост сопротивления,  $\rho$ , 4-слойного графена с понижением температуры,  $T$ , от 300 К до 77 К (слабая полупроводниковая зависимость  $\rho(T)$ ), определяемый рассеянием носителей заряда на границах зерен и взаимодействием зерен, расположенных в разных слоях графена. Зависимость  $\rho(T)$  монослойного графена демонстрирует слабый металлический ход, определяемый рассеянием на границах зерен.
2. Корреляции между величиной работы выхода металла (Au, Pt, Ag, Cr, Ni, Ti) и значением контактного сопротивления не наблюдается.
3. Интеграция графена в качестве прозрачного контакта к GaPNAs светодиодным гетероструктурам увеличивает растекание носителей заряда (составляет порядка 300–400 мкм).
4. Перенос графена на структурированные поверхности (сферы опала  $\text{SiO}_2$ ) приводит к росту сопротивления графена в 3,2 раза в сравнении со случаем расположения на планарной поверхности  $\text{SiO}_2$ .

5. Энергия адгезии между графеном и массивом вискеро́в составляет  $0,3\div 0,7$  Дж/м<sup>2</sup>, что согласуется с ранее полученными данными для энергии адгезии графена к планарной поверхности оксида кремния.
6. Интеграция графена и массива GaN пирамид позволила сузить спектр электролюминесценции светодиодных GaN гетероструктур. Интеграция графена и массива ZnO вискеро́в, а также графена и массива GaN вискеро́в позволила повысить чувствительность фотодетекторных структур в ультрафиолетовой области спектра (вплоть до 298 нм), где индий-оловянный оксид существенно поглощает свет.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Novoselov, K.S.** Electric field effect in atomically thin carbon films [Text] / Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. // *Science*. – 2004. – Vol. 306 (5696). – P.666-669.
- [2] **Lee, J.** 25 GHz Embedded-Gate Graphene Transistors with High-K Dielectrics on Extremely Flexible Plastic Sheets [Text] / Lee J., Ha T.J., Li H., Parrish K.N., Holt M., Dodabalapur A., Ruoff R.S., Akinwande, D. // *ACS Nano*. – 2013. – Vol. 7 (9). – 7744-7750.
- [3] **Cheng, R.** High-frequency self-aligned graphene transistors with transferred gate stacks [Text] / Cheng R., Bai J., Liao L., Zhou H., Chen Y., Liu L., Lin Y C, Jiang S., Huang Y., Duan X. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 109 (29). P. 11588-11592.
- [4] **Wu, Y.** State-of-the-art graphene high-frequency electronics [Text] / Wu Y., Jenkins K.A., Valdes-Garcia A., Farmer D. B., Zhu Y., Bol A. A., Dimitrakopoulos C., Zhu W., Xia F., Avouris P., Lin Y. M. // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12 (6). – P. 3062-3067.
- [5] **Pospischil, A.** CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands [Text] / Pospischil A., Humer M., Furchi M. M., Bachmann D., Guider R., Fromherz T., Mueller T. // *Nature Photonics*. – 2013. – Vol. 7 (11). – P. 892-896.
- [6] **Avouris, P.** Graphene Photonics, Plasmonics and Optoelectronics [Text] / Avouris P., Freitag M. // *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*. – 2013. – Vol. 20 (1). – P. 1-12.
- [7] **Bae, S.** Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes [Text] / Bae S., Kim H., Lee Y., Xu X., Park J. S., Zheng Y., Balakrishnan J., Lei T., Kim H. R., Song Y. I., Kim Y.-J., Kim K. S., Özyilmaz B., Ahn J.-H., Hong B. H., Iijima S. // *Nature nanotechnology*. – 2010. – Vol. 5 (8). – P. 574-578.
- [8] **Kobayashi, T.** Production of a 100-m-long high-quality graphene transparent conductive film by roll-to-roll chemical vapor deposition and transfer process [Text] / Kobayashi T., Bando M., Kimura

N., Shimizu K., Kadono K., Umezu N., Miyahara K., Hayazaki S., Nagai S., Mizuguchi Y., Murakami Y., Hobara D. // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 102 (2). – P. 023112-023112.

[9] **Li, X.** Large-area graphene single crystals grown by low-pressure chemical vapor deposition of methane on copper [Text] / Li X., Magnuson C. W., Venugopal A., Tromp R. M., Hannon J. B., Vogel E. M., Colombo L., Ruoff R. S. // *Journal of the American Chemical Society*. – 2011. – Vol. 133 (9). – P. 2816-2819.

[10] **Tsen, A.W.** Tailoring electrical transport across grain boundaries in polycrystalline graphene [Text] / Tsen A. W., Brown L., Levendorf M.P., Ghahari F., Huang P.Y., Havener R.W., Ruiz-Vargas C.S., Muller D.A., Kim P., Park J. // *Science*. – 2012. – Vol. 336 (6085). – P. 1143-1146.

[11] **Koepke, J.C.** Atomic-Scale Evidence for Potential Barriers and Strong Carrier Scattering at Graphene Grain Boundaries: A Scanning Tunneling Microscopy Study [Text] / Koepke J. C., Wood J. D., Estrada D., Ong Z. Y., He K. T., Pop E., Lyding J. W. // *ACS Nano*. – 2013. – Vol. 7 (1). – P. 75-86.

[12] **Kim, K.** Grain boundary mapping in polycrystalline graphene [Text] / Kim K., Lee Z., Regan W., Kisielowski C., Crommie M. F., Zettl A. // *ACS Nano*. – 2011. – Vol. 5 (3). – P. 2142-2146.

[13] **Tsen, A.W.** Tailoring electrical transport across grain boundaries in polycrystalline graphene [Text] / Tsen A. W., Brown L., Levendorf M. P., Ghahari F., Huang P. Y., Havener R. W., Ruiz-Vargas C.S., Muller D.A., Kim P., Park J. // *Science*. – 2012. – Vol. 336 (6085). – P. 1143-1146.

[14] **Wu Y.** High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon [Text] / Wu Y., Lin Y.M., Bol A.A., Jenkins K.A., Xia F., Farmer D.B., Avouris, P. // *Nature*. – 2011. – Vol. 472 (7341). – P. 74-78.

[15] **Liang, X.** Toward clean and crackless transfer of graphene. Liang X., Sperling B.A., Calizo I., Cheng G., Hacker C.A., Zhang Q., Obeng Y., Yan K., Peng H., Li Q., Zhu X., Yuan H., Hight Walker A.R., Liu Z., Peng L.M., Richter C.A [Text] / *ACS Nano*. – 2011. – Vol. 5 (11). – P. 9144-9153.

[16] **Dean, C.R.** Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics [Text] / Dean C.R., Young A.F., Meric I., Lee C., Wang L., Sorgenfrei S., Watanabe K., Taniguchi T., Kim P., Shepard K. L., Hone J. // *Nature Nanotechnology*. – 2010. – Vol. 5. – P. 722-726.

[17] **Levy, N.** Strain-induced pseudo-magnetic fields greater than 300 tesla in graphene nanobubbles [Text] / Levy N., Burke S. A., Meaker K. L., Panlasigui M., Zettl A., Guinea F., Castro Neto A.H, Crommie M. F. // *Science*. – 2010. – Vol. 329 (5991). – P. 544-547.

[18] **Zhu, X.** Enhanced Light-Matter Interactions in Graphene-Covered Gold Nanovoid Arrays [Text] / Zhu X., Shi L., Schmidt M.S., Boisen A., Hansen O., Zi J., Xiao S., Mortensen N.A. // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13 (10). – P. 4690-4696.

- [19] **Reina, A.** Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition [Text] / Reina A., Jia X., Ho J., Nezich D., Son H., Bulovic V., Dresselhaus M.S., Kong J. // Nano Letters. – 2008. – Vol. 9 (1). – P.30-35.
- [20] **Han, G. H.** Influence of copper morphology in forming nucleation seeds for graphene growth [Text] / Han G.H., Güneş F., Bae J. J., Kim E. S., Chae S. J., Shin H. J., Choi J.Y., Pribat D., Lee Y.H. // Nano Letters. – 2011. – Vol. 11 (10). – P. 4144-4148.
- [21] **Watanabe, E.** Low contact resistance metals for graphene based devices [Text] / Watanabe E., Conwill A., Tsuya D., Koide Y. // Diamond and Related Materials.– 2012. – Vol. 24. – P. 171-174.
- [22] Balci, O. Rapid thermal annealing of graphene-metal contact [Text] / Balci O., Kocabas C. // Applied Physics Letters.– 2012. – Vol. 101 (24). – P. 243105-243105.
- [23] **Robinson, J.A.** Contacting graphene [Text] / Robinson J. A., LaBella M., Zhu M., Hollander M., Kasarda R., Hughes Z., Trumbull K., Cavalero R. Snyder D. // Applied Physics Letters.– 2011. – Vol. 98 (5). – P.053103-053103.
- [24] **Bunch, J. S.** Adhesion mechanics of graphene membranes [Text] / Bunch J. S., Dunn M. L. // Solid State Communications. – 2012. – Vol. 152 (15). – P.1359-1364.
- [25] **Nie, B.** Monolayer graphene film on ZnO nanorod array for high performance Schottky junction ultraviolet photodetectors [Text] / Nie B., Hu J.G., Luo L.B., Xie C., Zeng L.H., Lv P., Li F.Z., Jie J.S., Feng M., Wu C.Y., Yu Y.Q., Yu S. H. // Small.– 2013. – Vol. 9 (17). – P. 2872-2879.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] **Бабичев, А.В.** Электронный транспорт в CVD-графене сантиметрового размера [Текст] / Бабичев А.В., Гасумянц В. Э., Бутко В.Ю. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия «Физико-математические науки». – 2011. – Вып. 2 (122). – С. 30-34.
- [A2] **Бабичев, А.В.** Электролюминесценция наногетероструктур  $\text{GaP}_x\text{N}_y\text{As}_{1-x-y}$  через прозрачный электрод, сформированный из CVD-графена [Текст] / Бабичев А.В., Бутко В.Ю., Соболев М.С., Никитина Е.В., Крыжановская Н.В., Егоров А.Ю. // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – Вып. 6. – С. 815-819.
- [A3] **Babichev, A.V.** Resistivity and thermopower of graphene made by chemical vapor deposition technique [Text] / Babichev A.V., Gasumyants V.E., Butko V.Y. // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 113 (7). – P. 076101.
- [A4] **Babichev, A.V.** GaN nanowire photodetector with new transparent contact based on graphene [Text] / Babichev A.V., Zhang H., Lavenus P., Julien F.H., Egorov A.Yu., Lin Y.T., Tu L.W., Tchernycheva M. // Applied Physics Letter. – 2013. – Vol. 103. – 201103.

- [A5] **Zhang H.** Characterization and modeling of a ZnO nanowire ultraviolet photodetector with graphene transparent contact [Text] / Zhang H., Babichev A.V., Jacopin G., Lavenus P., Julien F.H., Egorov A.Yu., Zhang J., Pauporté T., Tchernycheva M. // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – Vol. 114. – 234505.
- [A6] **Бабичев, А.В.** Сверхширокий спектр электролюминесценции светодиодных гетероструктур на основе полупроводниковых твердых растворов GaPAsN [Текст] / Бабичев А.В., Лазаренко А.А., Никитина Е.В., Пирогов Е.В., Соболев М.С., Егоров А.Ю. // *Физика и техника полупроводников*. – 2014. – Т. 48. – Вып. 4. – С. 518-522.
- [A7] **Babichev, A.V.** Electron Transport and Thermoelectric Power in CVD Grown Centimeter Size Graphene [Text] / Babichev A.V., Gasumyants V.E., Butko V.Y. // *Book of abstracts. International Conference “Advanced carbon nanostructures”*. – St Petersburg, 2011. – P. 72.
- [A8] **Babichev, A.V.** On possibility of contribution of different types of carriers in electron transport in CVD-grown centimeter size graphene [Text] / Babichev A.V., Gasumyants V.E., Butko V.Y. // “II International Conference for Young Scientists LOW TEMPERATURE PHYSICS (ICYS–LTP–2011)”. *Conference programme and Abstract book*. – Kharkiv, 2011. – P. 133.
- [A9] **Бабичев, А.В.** Особенности диффузионного транспорта в CVD-графене [Текст] / Бабичев А.В., Гасумянц В. Э., Бутко В.Ю. // *Наука и инновации в технических университетах: материалы Пятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых*. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 93-95.
- [A10] **Бабичев, А.В.** Светодиодные наногетероструктуры  $\text{GaP}_x\text{N}_y\text{As}_{1-x-y}$  с прозрачным электродом на основе CVD-графена [Текст] / Бабичев А.В., Бутко В.Ю., Соболев М.С., Никитина Е.В., Егоров А.Ю., Vitusevich S. // *Наука и инновации в технических университетах: материалы Пятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых*. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 92-93.
- [A11] **Babichev, A.V.** Transport and Thermo Power in CVD Grown Centimeter Size Graphene [Text] / Babichev A.V., Gasumyants V.E., Butko V.Y. // *ACSIN 2011, 11th International conference on Atomically Controlled surfaces, Interfaces and Nanostructures, Book of Abstracts*. – St. Petersburg, 2011. – P. 302.
- [A12] **Babichev, A.V.** Investigation of metal–graphene contacts [Text] / Babichev A.V., Butko V.Yu., Gasumyants V.E., Martynova O.A., Pud S., Sydoruk V., Offenhäusser A., Vitusevich S // “III International Conference for Young Scientists LOW TEMPERATURE PHYSICS (ICYS–LTP–2012)”. *Conference programme and Abstract book*. – Kharkiv, 2012. – P. 179.
- [A13] **Babichev, V. E.** Electrical Transport and Thermopower in CVD Grown Graphene [Text] / Babichev A.V., Gasumyants V.E., Butko V.Y. // *8th Advanced Research Workshop “Fundamentals of Electronic Nanosystems”*, НАНОПИТЕР-2012. – СПб.: СОЛЮ, 2012. – С. 32.

- [A14] **Бабичев, А.В.** Удельное сопротивление и термоэдс монослойного графена большой площади [Текст] / Бабичев А.В., Гасумянц В. Э., Бутко В.Ю. // Тезисы докладов XXXVI совещания по физике низких температур. Физико-Технический институт им. А. Ф. Иоффе. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 233.
- [A15] **Babichev, A.V.** Resistivity and thermopower of monolayered graphene [Text] / Babichev A.V., Gasumyants V.E., Butko V.Y. // 2<sup>nd</sup> International School on Surface Science “Technologies and Measurements on Atomic Scale”. – Sochi, 2012.
- [A16] **Babichev, A. V.** Electroluminescence of  $\text{GaP}_x\text{N}_y\text{As}_{1-x-y}$  Nanoheterostructures through a Transparent Electrode Made of CVD Graphene [Text] / Babichev A. V., Butko V. Yu., Sobolev M. S., Nikitina E. V., Kryzhanovskaya N. V., Egorov A. Yu. // 2<sup>nd</sup> International School on Surface Science “Technologies and Measurements on Atomic Scale”. – Sochi, 2012.
- [A17] **Бабичев, А.В.** Оптимизация прозрачных контактов на основе CVD-графена для светодиодных гетероструктур  $\text{GaP}_x\text{N}_y\text{As}_{1-x-y}$  [Текст] / Бабичев А.В., Бутко В.Ю., Никитина Е.В., Егоров А.Ю., Гасумянц В.Э., Vitusevich S. // Наука и инновации в технических университетах: материалы Шестого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых.– СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 152-154.
- [A18] **Zhang, H.** Electrical properties and photodetection with electrodeposited ZnO nanowires [Text] / Zhang H., Lavenus P., Jacopin G., De Luna Bugallo A., Julien F.H., Babichev A., Lupan O., Viana B., Pauporté T., Tchernycheva M. // 5th plenary workshop of the French GDR “Semiconductor Nanowires”. – Saint-Martin-de-Londres, 2013.
- [A19] **Butko, V.Y.** Interfacial and dimensional effects in graphene based nanostructures [Text] / Butko V.Y., Fokin A.V., Nevedomsky V.N., Babichev A.V., Butko A.V., Kumzerov Y.A. // Advanced Carbon Nanostructures ACNS`2013. – Saint-Petersburg.: Из-во ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2013. – С.107.
- [A20] **Бабичев, А.В.** Изучение оптических свойств светодиодных гетероструктур на основе массива GaN пирамид [Текст] Бабичев А.В., Tchernycheva M. // «Наука и инновации в технических университетах: материалы Седьмого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых.» – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 174-175.
- [A21] **Бабичев, А.В.** Светодиодные гетероструктуры на основе массива GaN пирамид с графеновым прозрачным контактом [Текст] / Бабичев А.В., Tchernycheva M. // «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника» Тезисы докладов 15-й всероссийской молодежной конференции, –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 70.