

«Утверждаю»

И.о. директора Физико-технологического
института Российской академии наук

Член-корр. РАН В.Ф. Буличев

« 07 » апреля 2014г.



О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Бабичева Андрея Владимировича «Влияние интерфейсов и поликристаллической структуры CVD-графена на транспорт носителей заряда», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа Бабичева А.В. посвящена исследованию влияния интерфейсов и поликристаллической структуры CVD-графена на транспорт носителей заряда. Автором представлен большой объем экспериментальных данных о температурных зависимостях удельного сопротивления и коэффициента термоэдс, зависимостях сопротивления TLM структур с различными металлами, выступающими в роли контактов к CVD-графену от расстояния между контактными площадками, представлены результаты по изучению оптических свойств перспективных видов гетероструктур, в которых графен используется как прозрачный проводящий контакт. Автором проведен анализ качества сформированного интерфейса между графеном и подложкой с помощью сканирующей электронной микроскопии сверхвысокого разрешения. На основе полученных данных произведена оценка энергии адгезии графена к массиву GaN вискеров, а также сделаны выводы о влиянии поликристаллических границ зерен CVD-графена на транспорт носителей заряда. Рассмотрено влияние интерфейсов графен/подложка и графен/металл на проводимость графена и контактное сопротивление металлов к графену. Автором проведено численное моделирование температурных зависимостей коэффициента термоэдс монослойного CVD-графена и путем сравнения с экспериментальными

данными сделаны оценки превалирующего механизма рассеяния носителей заряда.

Полученная новая информация о роли границ зерен и интерфейсов между графеном и подложкой в определении транспортных свойств носителей заряда и контактов к графену использована при формировании графенового контакта к ряду планарных и сильно-структурированных классов гетероструктур для последующего исследования их оптических характеристик. Автором показано, что применение графена вместо индий-оловянного оксида позволяет улучшить параметры светодиодных и фотодетекторных гетероструктур, исследуемых в диссертационной работе.

Актуальность темы диссертации подтверждается большим числом опубликованных работ по исследованию свойств графена, а также зарегистрированных патентов на устройства на основе графена. На графене, полученном методом отшелушивания, продемонстрирован целый ряд новых физических эффектов, отмеченных присуждением Нобелевской премии по физике 2010 года. В свою очередь, несмотря на высокое структурное качество отшелушенного графена, в настоящее время возникают технологические трудности в получении чешуек с заданным числом слоев, их локализации на подложке и получении графена с одинаковым числом слоев на большой площади покрытия поверхности.

В последние годы развиваются методы роста графена на большой площади, которые позволяют говорить о перспективности использования графена в полупроводниковой индустрии. Одним из методов, наиболее приближенных к практическому применению, является метод химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод роста). Высокая скорость роста, масштабируемость вплоть до метровых размеров, возможность переноса графена на требуемую подложку, низкая стоимость являются основными преимуществами CVD-графена. К недостаткам данной методики можно отнести поликристаллическую структуру CVD-графена. Типичный размер зерен CVD-графена лежит в пределах от 250 нм до нескольких микрон, что

приводит к влиянию поликристаллической структуры на транспорт носителей заряда в графене и устройств на его основе.

Сформированный интерфейс графен/подложка влияет на транспорт носителей заряда в графене. Особенности взаимодействия графена с подложкой наряду со степенью структурированности интерфейса вносят вклад как в транспорт носителей заряда, так и в контактные свойства металлов к графену. Проведение исследований влияния интерфейсов и поликристаллической структуры CVD-графена на транспорт носителей заряда необходимо как с фундаментальной точки зрения, так и для ряда практических применений CVD-графена, чему и посвящена представленная диссертационная работа.

Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной и представляет интерес, как с научной, так и с практической точки зрения.

Новизна исследований и основные полученные результаты

Наиболее значительные научные результаты, полученные в диссертации Бабичева А.В., заключаются в следующем:

1. Продемонстрирован рост сопротивления 4-слойного графена с понижением температуры 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. Температурная зависимость сопротивления монослойного графена демонстрирует слабый металлический тип, определяемый рассеянием на границах зерен.

2. Проведено исследование контактного сопротивления, $R_c \cdot W$, металлов к графену на миллиметровом масштабе. Показано, что большие значения контактного сопротивления определяются слабым связыванием между металлом и графеном, а также вкладом границ зерен. Контактное сопротивление не зависит от работы выхода металла (Ag, Pt, Cr, Au, Ti, Ni).

3. Перенос графена на структурированные поверхности (сферы опала SiO_2) приводит к росту сопротивления графена в 3,2 раза в сравнении со случаем расположения на планарной поверхности SiO_2 . Оценочное значение энергии адгезии между графеном и массивом вискероов составляет $0,3 \div 0,7$

Дж/м², что согласуется с ранее полученными данными для энергии адгезии графена к планарной поверхности оксида кремния.

4. Проведены исследования по интеграции графена с перспективными оптоэлектронными гетероструктурами. Показано, использование графена в качестве прозрачного контакта к GaPNAs светодиодным гетероструктурам увеличивает растекание носителей заряда (составляет порядка 300–400 мкм), к массиву GaN пирамид сужает спектр электролюминесценции светодиодных GaN гетероструктур. Интеграция графена и массива ZnO вискером, а также графена и массива GaN вискером повышает чувствительность фотодетекторных структур в ультрафиолетовой области спектра (вплоть до 4,15 эВ), где ИТО существенно поглощает свет.

Все полученные Бабичевым А.В. результаты являются новыми и интересными с научной и практической точек зрения.

Достоверность полученных автором научных результатов определяется использованием надежных экспериментальных методик, позволяющих проводить измерения с высокой точностью, использованием современных средств анализа экспериментальных данных. Обоснованность выводов и научных положений подтверждается корректностью постановки задачи и их широкой апробацией в публикациях автора диссертационной работы и его докладах на конференциях.

Научная и практическая значимость диссертационной работы.

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

Практическое значение работы состоит в использовании полученных результатов при формировании графенового прозрачного контакта к перспективным классам планарных гетероструктур (на основе GaPNAs) и

гетероструктур с сильноструктурированной поверхностью (на основе GaN, ZnO). 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.

Основные результаты диссертационной работы Бабичева А.В. могут быть использованы в СПбГУ (Санкт-Петербургский государственный университет), СПбГЭТУ (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет), СПбГПУ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет), ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе), СПб АУ НОЦНТ РАН (Академический университет), ФТИАН (Физико-технологический институт), МГУ (Московский государственный университет), ФИАН (Физический институт им. П.Н.Лебедева), других научных и учебных организациях, занимающихся фундаментальными и прикладными исследованиями в области графена.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 6 статей в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, и 15 тезисов докладов, раскрывающих основное содержание и научные положения диссертации.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, выводы и основные научные результаты, выносимые на защиту.

Замечания по диссертационной работе.

1. В диссертационной работе автором представлены результаты по исследованиям монослойного и 4-слойного графена. Каким методом определялось число слоев CVD-графена? К сожалению, данная информация не отражена в диссертации. Чем определяется выбор именно 4-слойного графена в качестве одного из объектов, исследованных в работе: особенностями методики синтеза, возможными практическими применениями или другими причинами?

2. Из текста диссертации непонятно (стр. 22), учитывался ли температурный сдвиг положения уровня электрохимического потенциала при численном расчете коэффициента термоэдс с учетом различных механизмов рассеяния носителей заряда.

3. В научной литературе, как подчеркивает автор, приводится

большое количество работ по исследованию контактных свойств графена, когда металл напыляется на поверхность графена. В чем преимущество рассмотренного в работе подхода, когда графен переносится на поверхность уже сформированных контактов? Где мог бы быть использован данный метод?

Указанные критические замечания не изменяют общего положительного впечатления от диссертации, которая выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченное научное исследование.

Заключение.

Диссертационная работа Бабичева А.В. изложена последовательно и отражает значительный объем проделанной экспериментальной работы, выполненной на высоком научном уровне, содержит новые научные результаты и положения, что соответствует критериям 9-14 «Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы Бабичев Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Результаты диссертационной работы были представлены на научном семинаре Физико-технологического института РАН «Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники» 24 февраля 2014 года. Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета, протокол № 2-14 от 7 апреля 2014г.

Отзыв составил

Ведущий научный сотрудник

К.ф.-м.н.

В.В. Вьюрков

Вьюрков Владимир Владимирович

К.ф.-м.н.

Ведущий научный сотрудник

Физико-технологический институт РАН

Нахимовский просп. 34, Москва, 117218, Россия

Тел. +7 499 129 5508

E-mail: vyurkov@ftian.ru