

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Бабичева Андрея Владимировича  
на тему:

“Влияние интерфейсов и поликристаллической структуры  
CVD-графена на транспорт носителей заряда”,  
представленную на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук по специальности  
01.04.07 – Физика конденсированного состояния

CVD-графен является одним из наиболее перспективных материалов современной электроники и оптоэлектроники. Важнейшее влияние на свойства и характеристики приборов, созданных на основе подобных материалов, оказывает состояние интерфейсов и поликристаллическая структура графена. В этой связи большой интерес проявляется к исследованию поверхностных и интерфейсных слоев полупроводниковых структур, и эффектов, оказывающих воздействие на транспорт носителей заряда в них. Существенное влияние уделяется проблеме формирования качественного интерфейса графен/планарная подложка. Особенно активно исследуются структуры, в которых графен используется в качестве прозрачного проводящего контакта, в том числе структуры графен/GaAs, графен/GaN и перспективные с точки зрения интеграции с кремнием графен/твердые растворы GaPNAs

Перспективу большого прогресса в современной наноэлектронике и фотонике во многом связывают с использованием наноструктурированных объектов, включая висеры, нанопирамиды и различные типы фотонных кристаллов. Диссертационная работа Бабичева А.В. посвящена изучению влияния интерфейсов и поликристаллической структуры CVD-графена на транспорт носителей заряда не только для планарных, но для сильноструктурированных подложек, что определяет высокую **научную и практическую актуальность** представленной работы.

Следует отметить **наиболее существенные полученные результаты** с точки зрения их новизны и значимости для науки и практики:

- 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.
- Корреляции между величиной работы выхода металла (Au, Pt, Ag, Cr, Ni, Ti) и значением контактного сопротивления не наблюдается.
- Интеграция графена в качестве прозрачного контакта к GaPNAs светодиодным гетероструктурам увеличивает растекание носителей заряда (составляет порядка 300–400 мкм).
- Перенос графена на структурированные поверхности (сферы опала  $\text{SiO}_2$ ) приводит к росту сопротивления графена в 3,2 раза в сравнении с случаем расположения на планарной поверхности  $\text{SiO}_2$ .
- 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.
- Интеграция графена к сильно структурированным поверхностям (массив GaN, ZnO вискеро́в, 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.

Диссертация Баби́чева А.В. является **цельной и законченной работой**, содержит ряд оригинальных результатов. Текст диссертации написан грамотным, хорошим и ясным научно-техническим языком. Оформление диссертации и представленный графический материал выполнены на высоком уровне.

Содержание автореферата дает полное представление об основных положениях, изложенных в диссертационной работе, а содержание



диссертации соответствует номеру специальности, по которой она представляется (01.04.07 – Физика конденсированного состояния).

Вместе с тем по диссертационной работе следует сделать несколько **замечаний**:

1. Недостаточно подробно рассмотрены типы дефектов в исследуемых слоях и их возможное влияние на транспорт носителей заряда в структурах, а также влияние границ раздела графен/подложка на параметры структур, в частности, на величину работу выхода.

2. Процессы, приводящие к росту чувствительности наноструктурированных образцов до значений, превышающих единицы А/Вт, а также методика определения величины чувствительности для исследованных структур, в работе рассмотрены не достаточно подробно.

3. Люминесцентные процессы в структурах на основе массива GaN пирамид рассмотрены недостаточно подробно. В частности, остается не до конца ясно в каких областях таких пирамид в первую очередь протекают процессы излучательной рекомбинации и как на такие процессы влияет применение графеновых контактов.

**Отмеченные замечания не снижают ценность работы и не носят принципиального характера.**

**Достоверность и обоснованность выводов и заключений** диссертанта подтверждается корректностью постановки задачи, использованием современных методов моделирования и совпадением результатов расчетов с опубликованными экспериментальными данными. Результаты, представленные в диссертации, были апробированы на научных конференциях и опубликованы в российских и зарубежных реферируемых журналах.

Таким образом, на основании изложенного выше, считаю, что диссертационная работа Бабичева А.В. является законченной научной работой, содержащей решение поставленной научно-технической задачи и по своей новизне и практической значимости **соответствует требованиям**, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с Положением № 842 О Порядке присуждения ученых степеней от 24 сентября 2013 г., а соискатель Бабичев А.В. достоин присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,  
Доцент каф. Микро- и Нанoeлектроники  
СПбГЭТУ "ЛЭТИ", к.ф.-м.н.  
197376, Санкт-Петербург,  
улица Профессора Попова, дом 5  
раб. тел.: (812) 234-31-64  
e-mail: [SATarasov@mail.ru](mailto:SATarasov@mail.ru)

Тарасов С.А.

Подпись заверяю  
Начальник отдела диссертационных советов  
СПбГЭТУ "ЛЭТИ"



Русяева Т.Л.  
24 апреля 2014 г.