

ОТЗЫВ

Официального оппонента 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».

Экспериментальная демонстрация ряда квантовых физических эффектов в графене привела к образованию нового научного направления, которое и по сей день является одним из самых актуальных в современной физике твердого тела. Успех нобелевских лауреатов А. Гейма и К. Новоселова был достигнут благодаря использованию простого метода получения слоев графена – их отшелушиванию от массивного высокоориентированного пиролитического графита (HOPG). Получаемый таким методом графен имеет высокое структурное качество, но пригоден только для создания одиночных микроустройств, в то время как для практического применения необходимо получать графен большой площади с одинаковым числом слоев. Поэтому поиски других, альтернативных к отшелушиванию технологий получения графена, а также исследование его свойств на больших масштабах является одной из **актуальных и важных задач** указанного направления физики твердого тела.

Одной из областей практических применений графена является его использование в качестве прозрачного проводящего контакта. В такого рода приложениях требование монокристалличности проводящих слоев не является обязательным, но критическими параметрами становятся их электропроводность, а также электрофизические свойства контактов с подводщими металлическими электродами.

Рецензируемая диссертационная работа посвящена исследованию указанных свойств графена, полученного с помощью одного из распространенных методов его получения – метода химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод). Поскольку CVD-графен имеет поликристаллическую структуру с размерами зерен от долей до нескольких микрон, в то время как типичные размеры светодиодных и фотодетекторных гетероструктур составляют сотни микрон и более, одной из задач работы было изучение влияния границ зерен на транспорт носителей заряда на масштабах, превышающих размер зерна. Другая важная задача, которая впервые решалась в диссертации – это исследование влияния материала подложки и ее поверхностной морфологии на латеральный транспорт носителей заряда по графену и на его контактное сопротивление с металлами.

Следует подчеркнуть, что ранее проведенные исследования латерального и

контактного сопротивления графена были выполнены, как правило, с использованием «классической» подложки оксида кремния и на типичном масштабе в десятки микрон.

Все вышесказанное говорит об **актуальности, новизне и практической значимости** проведенных исследований.

В работе получена **новая информация** о вкладе зерен CVD-графена в транспорт носителей заряда на различных масштабах, величине контактного сопротивления ряда металлов к графену 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.

Среди полученных в диссертации результатов, которые имеют **научную новизну** на мировом уровне следует отметить следующие:

1. Впервые получены данные о температурной зависимости коэффициента термоэдс монослойного и 4-слойного CVD-графена в диапазоне температур от 298 К до 77 К.
2. Обнаружены качественное различие вида температурной зависимости электросопротивления, $\rho(T)$, для моно и 4-слойного графена, которое объясняется различными путями протекания тока через границы зерен, а также рост сопротивления графена на структурированной поверхности (сфер опала) по сравнению со случаем его расположения на планарной поверхности.
3. Впервые измерено контактное сопротивление металлов к графену, расположенному на поверхности арсенида галлия для оптоэлектронных применений и установлено отсутствие корреляции между величиной работы выхода металла (Au, Pt, Ag, Cr, Ni, Ti) и значением контактного сопротивления.
4. Показано, что фотодетекторных структуры на основе массивов GaN, ZnO вискерев, GaN пирамид с графеновыми контактами имеют более узкий спектр электролюминесценции по сравнению с такими же структурами с контактами из индий-оловянного оксида.
5. Показано, что использование графена в качестве прозрачного контакта к GaPNAs светодиодным гетероструктурам увеличивает область сбора носителей заряда до размера порядка 300–400 мкм.

6. Впервые измерены спектры электролюминесценции одиночного GaN вискера через графеновый прозрачный контакт.

Диссертация состоит из 4х глав, введения, заключения и списков публикаций автора (21 статей и тезисов докладов) и цитируемой литературы из 203 наименований. Диссертация в целом хорошо оформлена и достаточно иллюстрирована полученными автором экспериментальными данными, однако как оформление, так и изложение не свободно от недостатков.

Замечания по диссертации:

1. Трудно согласиться с автором, который в формулировке целей работы ставит на первое место ставит слово «исследование», например, «исследование вклада границ в транспорт...». По-видимому, уместнее его заменить на « оценка» или « установление».
2. Отсутствует единая нумерация рисунков – в каждой главе она начинается с номера 1.
3. Не раскрыто сокращение TLM, не даны определения терминам «длина переноса», «планааризация доменов», « сверхтонкие слои титана».
4. Одним из важных результатов работы является обнаружение существенного различия в свойствах контактов к графену с различным количеством слоев, однако в тексте диссертации отсутствует информация о том, каким методом это количество определялось.
5. В описаниях интерпретации полученных результатов автор во многих местах слишком лаконичен, что не предоставляет возможности точно понять их суть. Так, остается непонятным: как слабое связывание металлов с графеном может приводить к его легированию в приконтактных областях (с.41) , а также объяснение причины нелинейности ВАХ контактов на монослойном графене и их линейности на 4х слойном (с.39).

Эти замечания не снижают ценности проведенных исследований и не затрагивают защищаемых положений.

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, определяется хорошей воспроизводимостью результатов, полученных на различных образцах с помощью хорошо апробированных экспериментальных методик, проведением в ряде случаев независимых измерений на нескольких измерительных установках, а также внутренне непротиворечивостью интерпретации экспериментальных результатов, базирующейся на современных представлениях теории.

По теме диссертации опубликована 21 работа, из них 6 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, результаты проведенных исследований докладывались на международных конференциях и хорошо известны специалистам в данной области исследований.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа «Влияние интерфейсов и поликристаллической структуры CVD-графена на транспорт носителей заряда» полностью соответствует профилю Диссертационного совета Д 002.205.01 и критериям, установленным Положением О ПОРЯДКЕ ПРИСУЖДЕНИЯ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842, а ее автор, Бабичев Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент, д. ф.-м. н., профессор,

Вывенко Олег Федорович

профессор кафедры электроники твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»,

Контактная информация:

Почтовый адрес: Старый Петергоф, ул. Ульяновская д. 1, Санкт-Петербург, 198504

Тел. (+7) 812-428-43-96

e-mail: vyvenko@nano.spbu.ru

ПОДПИСЬ РУКИ
ЗАВЕРЯЮ. НАЧАЛЬНИК
ОТДЕЛА
Н. А. ГОРИНОВА

