

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу

**Васильевой Галины Юрьевны**

**“ Особенности магнетосопротивления и терагерцовой фотопроводимости в графене”**,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10

– «Физика полупроводников».

Диссертация Г.Ю.Васильевой посвящена исследованию транспортных свойств графеновых материалов - монослойного и биграфена, и затрагивает также вопросы терагерцовой плазмоники, естественным образом связанные с проблемами транспорта в графене. Автор сконцентрировал усилия на исследовании магнетотранспорта допированного и недопированного графенов, поведение которых определяется весьма различными потенциалами межчастичного взаимодействия.

**Актуальность** работы связана с тем, что в настоящее время графен рассматривается как один из основных перспективных материалов электроники. Несмотря на ряд серьезных проблем с внедрением этого материала, тенденция роста числа работ, как фундаментальных, так и прикладных, растет. Роль России в графеновой науке достаточно велика, что подтверждается организацией первой самостоятельной российской конференции.

Наибольшие трудности, связанные с графеном, проявляются при переходе от фундаментальных работ, связанных с изучением «идеального» графена с определёнными краями, чётко известным числом слоёв и т.п. к реальному графену, полученному способами, существующими на сегодняшний день. Работы, попадающие в такой переход, выглядят менее яркими, но абсолютно необходимы для дальнейшей практики использования графена.

Таким образом, данная диссертация ценна и актуальна в силу следующих причин.

- тщательно разбирается, как теория идеального монослойного- и биграфена может быть применена для интерпретации экспериментов по магнетосопротивлению реальных образцов;
- автор приобрёл уникальный опыт работы с несколькими типами графеновых материалов и чувствует особенности каждого из этих материалов;
- физическая по своей направленности работа естественным образом выходит на два актуальных приложения – датчики магнитного поля холловского типа и терагерцовое детектирование, причём последнее приложение выходит за рамки чисто графеновой тематики

**Научная новизна работы** состоит в том, что впервые проведено подробное сопоставление магнето-транспортных свойств сильно легированных и нелегированных монослоёв графена и биграфенов.

Такое исследование позволило выявить ряд чрезвычайно красивых физических закономерностей – зависимостей от магнитного поля, которые ранее вообще не наблюдались, а лишь предсказывались в весьма рафинированных моделях. В частности, необычно выглядит положительное магнетосопротивление (MR) сильно-легированных образцов, которое соотнесено с теорией и описано качественно.

Важным является успешная обработка экспериментальных данных по биграфену на основе представлений о двух типах носителей.

Интересен и важен для практических приложений инвариант – положительное MR при высокой концентрации дырок– момент, который остался до конца не ясен и требует развития.

Методически ценным является противопоставление образцов, в которых максимально обострены короткодействующее (в одном случае) и кулоновское (в другом)

взаимодействия. Здесь особенно важно, что зависимость сопротивления от магнитного поля (МП) прослежено в широком интервале МП и дана удовлетворительная качественная интерпретация изменения характера зависимостей. Вообще, стремление дать качественную интерпретацию во всех случаях характеризует зрелость научного работника и свойственно данной диссертации.

Важным является успешная обработка экспериментальных данных по биграфену на основе представлений о двух типах носителей.

Большое значение имеют результаты по ТГц проводимости графенового образца, причем образца, полученного на карбиде кремния. На данный момент при большом количестве теоретических работ по усилителям, детекторам ТГц излучения, ТГц-антеннам, фазированным ТГц-антенным решёткам на графене и т.п. практически реализованных и описанных в литературе схем крайне мало, и полученные данные по ТГц проводимости представляют собой серьезный шаг к получению такого класса приборов.

**Практическая значимость работы.** Понимание транспортных свойств сильно легированных и нелегированных монослоёв графена и биграфенов необходимо, например, при разработке датчиков магнитного поля. При калибровке реальных датчиков необходимо чётко представлять себе, какие качественные закономерности они должны показывать.

Здесь следует выделить удачный выбор объекта, так как для этого приложения (впрочем, как для ТГц) биграфены предпочтительнее, чем монослойные образцы.

Большое значение, как уже сказано выше, имеет обнаружение ТГц проводимости графена, причем образца, полученного на карбиде кремния. В отличие от отшелушенных образцов, интересных для «науки», но не имеющих прикладного значения, карбид кремния как источник графена исключительно важен и практически безальтернативен при массовом производстве графена в будущем.

Причины того, что такой графен задерживает ТГц излучение, могут быть связаны просто с тем, что дефекты поверхности работают на таком графене так же, как зонд ближнеполевого микроскопа.

В сочетании с меандро-образной формой образца, что позволяет резко поднять сопротивление, выбор объекта следует считать исключительно удачным для возможных практических приложений, а образец на его основе – вполне успешным прототипом работающего датчика.

Отметим ряд других важных и интересных результатов, не отраженных в положениях, выносимых на защиту, и выводах.

Сделан анализ методов очистки образцов от примесей, из которого следует, что отжиг при 300 °С удаляет кулоновские примеси, а очистка в AFM уменьшает количество дефектов, создающих короткодействующий потенциал. Очистка является рутинным элементом работы, однако в случае графена от этого зависит получаемые физические закономерности и будущий технологический регламент.

**Достоверность и качество** полученных результатов одобрены коллегами в ходе устных докладов на ряде представительных международных и российских конференций; среди этих докладов были и приглашенные.

**Автореферат** полностью соответствует диссертации и отличается структурной целостностью, при которой автор не стремится «отсечь лишнее», а разрабатывает совершенно независимое изложение наиболее ярких достижений работы.

Автореферат и диссертация отличается удачным изложением основных положений, выносимых на защиту: в каждом из положений понятна суть результата и фиксируется максимум информации, который можно усвоить, не обращаясь к основному тексту.

### **Недостатки работы**

1. Не вполне понятно из текста объяснение того, почему на зависимости фотопроводимости от температуры появляется

выброс на 5K и, главное, как эта температура формируется. Она не является, очевидно, универсальной константой и её было бы желательно как-то оценить.

2. В главе 3 содержится результат, связанный с получением универсального положительного MR при высокой p-концентрации. Оно не зависит от температуры и самой этой концентрации. Если оно не зависит и от формы образца, можно предположить, что все дырки собираются в лужицы. Можно ли такое предположение проверить экспериментально.

3. Известно, что раскачка плазмонных колебаний в графене, как и в любой поверхностно-активной среде, требует согласования волнового вектора падающего фотона и плазмона (на заданной частоте). Эта задача решается за счёт дифракционных решёток, призм, острых выступов, как в ближнеполевой микроскопии и т.д. Непонятно, каков механизм захвата ТГц излучения в данном случае. Можно думать, что на «зазубринах» поверхности эпитаксиального графена. Тогда фотопроводимость должна зависеть от подготовки образца и на разных эпитаксиальных образцах быть разной. Неясно тогда, есть ли какие – то наблюдения на разных эпитаксиальных образцах?

4. Диссертация написана легким, «незаумным» языком, особенно первые три главы и в этой своей части может быть использована в готовом виде как пособие для студентов по электронным свойствам графена. В то же время при переходе к изложению собственных оригинальных результатов автор пытается писать «серьезно» и излагает мельчайшие детали, теряя в некоторых случаях концептуальный смысл изложения.

Сделанные замечания не снижают научной ценности работы.

Диссертационная работа Васильевой Галины Юрьевны «Особенности магнетосопротивления и терагерцовой фотопроводимости в графене» является завершённым научным исследованием, в нём внесён существенный вклад в

решение проблемы магнетосопротивления графена и задач терагерцовой электроники графена.

Считаю, что диссертационная работа Г.Ю.Васильевой удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор по своей квалификации и по результатам проведенного исследования заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Николай Игоревич Алексеев

Доктор физико-математических наук

Ведущий научный сотрудник Центра Микротехнологии и Диагностики С.-Петербургского Электротехнического

Университета ЛЭТИ

Тел. 911 943 56 24

[NIAlekseyev@yandex.ru](mailto:NIAllekseyev@yandex.ru)

30.09.2015