

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.166.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27.11.2019 № 16

О присуждении Азаровой Екатерине Сергеевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Электронные и транспортные свойства периодических и неупорядоченных барьерных структур на основе дираковских материалов» по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» – принята к защите 18 сентября 2019 г. (протокол заседания № 10) диссертационным советом Д212.166.01, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ННГУ им. Н.И. Лобачевского), 603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, приказ от 11.04.2012 г. №105/нк о создании диссертационного совета.

Соискатель Азарова Екатерина Сергеевна, 1991 года рождения, в 2014 году окончила ННГУ им. Н.И. Лобачевского, в 2018 году завершила освоение программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре ННГУ им. Н.И. Лобачевского по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (срок обучения с 01.10.2014 г. по 01.10.2018 г.), работает в должности младшего научного сотрудника НИЛ мощных волоконных лазеров и лазерных систем ближнего и среднего ИК диапазонов отдела фундаментальных и прикладных исследований

ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Диссертация выполнена на кафедре теоретической физики физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Максимова Галина Михайловна, доцент кафедры теоретической физики физического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Официальные оппоненты:

1. Кудасов Юрий Бориславович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-производственного центра физики федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»),

2. Свинцов Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник – заведующий лабораторией оптоэлектроники двумерных материалов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ), дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва" (МГУ им. Н.П. Огарёва) – в своем положительном отзыве, составленном и подписанном Зюзиным Александром Михайловичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой экспериментальной и теоретической физики МГУ им. Н.П. Огарева, и утвержденном Вдовиным Сергеем Михайловичем, кандидатом экономических наук, доцентом, ректором МГУ им. Н.П. Огарева, отметила, что «тема диссертационного исследования Е.С. Азаровой, несомненно, является актуальной». Отмечается, что «в диссертации решен ряд задач в области физики наноструктур на основе щелевых дираковских материалов, каждая

из которых обладает определенной теоретической значимостью», и получены новые научно-значимые достоверные результаты, которые «являются оригинальными и имеют особое значение для определения транспортных характеристик различных устройств и структур на основе двумерных щелевых дираковских материалов». В отзыве также указывается, что «По своей актуальности, научной и практической значимости работа отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в частности, разделу II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.13, а ее автор, Азарова Екатерина Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 39 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 38 работ, из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, в том числе индексируемых международными библиографическими базами Web of Science и Scopus, и 33 публикации в сборниках трудов и тезисов докладов российских и международных научных конференций. В публикациях соискателя по теме диссертации отражена проделанная им работа по теоретическому исследованию электронных, транспортных и локализационных свойств структур на основе щелевого графена и других графеноподобных материалов (в частности, силицена) с дираковским спектром.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Maksimova, G. M. Graphene superlattice with periodically modulated Dirac gap / G. M. Maksimova, **E. S. Azarova**, A. V. Telezhnikov, V. A. Burdov // Physical Review B. – 2012. – Vol. 86. – P. 205422-1–205422-7 (объем – 7 стр.);
2. Azarova, E. S. Transport in graphene nanostructures with spatially modulated gap and potential / **E. S. Azarova**, G. M. Maksimova // Physica E. – 2014. – Vol. 61. – P. 118–124 (объем – 7 стр.);
3. Azarova, E. S. Effect of weak disorder on delocalization properties of gapped graphene superlattices / **E. S. Azarova**, G. M. Maksimova // Physica E. – 2015. – Vol. 74. – P. 1–9 (объем – 9 стр.);
4. Azarova, E. S. Spin- and valley-dependent Goos-Hänchen effect in silicene and gapped graphene structures / **E. S. Azarova**, G. M. Maksimova // Journal of Physics

and Chemistry of Solids. – 2017. – Vol. 100. – P. 143–147 (объем – 5 стр.);

5. Azarova, E. S. Massive Dirac fermions in one-dimensional inhomogeneous nanorings / **E. S. Azarova**, G. M. Maksimova, V. A. Burdov // Physica E. – 2019. – Vol. 106. – P. 140–149 (объем – 10 стр.);

Сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, **достоверны**. Автором **лично, либо в соавторстве** при его непосредственном участии, получены численные результаты и проведены аналитические вычисления, представленные в данных работах. **Автор принимал участие** в обсуждении и анализе полученных результатов и подготовке работ к печати. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов.

1) Вальков Валерий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» в своём отзыве на автореферат отмечает, что «диссертация представляет собой оригинальное исследование и выполнена на высоком теоретическом уровне», «в диссертации изложены фундаментальные результаты, вносящие весомый вклад в теорию двумерных материалов», а также подчеркивает практическое значение этих результатов. Отзыв не содержит замечаний.

2) Загороднев Игорь Витальевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 184 «Методов получения тонких пленок и пленочных структур» Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что соискателем «получен ряд новых важных результатов», и «научная новизна представленной диссертации подтверждена публикациями в высокорейтинговых журналах и не вызывает сомнений». Отзыв содержит одно замечание: «В связи с 4-м положением, выносимым на защиту, в котором сказано, что «в кольцах Ааронова-Бома из щелевого графена персистентные токи электронов проводимости определяются только нижними уровнями...» возникает вопрос – насколько эти токи чувствительны к наличию и структуре краевых состояний, которые в узких

графеновых полосках могут играть существенную роль, в том числе влиять на величину и даже наличие энергетической щели».

3) Качоровский Валентин Юрьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник сектора теории оптических и электрических явлений в полупроводниках Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, в своём отзыве на автореферат отмечает, что «Диссертационная работа Е.С. Азаровой <...> написана как нельзя вовремя и актуальность темы диссертации несомненна». В отзыве сказано, что практическая значимость работы также не вызывает сомнений. Отзыв содержит одно замечание: «В автореферате не проясняется, для каких из изучаемых эффектов принципиально использование именно графена, а какие могут наблюдаться и в других сверхрешетках на основе обычных материалов, скажем GaAs. Например, было бы хорошо прояснить, какую роль в проблеме локализации в неупорядоченной сверхрешетке, а также при вычислении незатухающих (persistent) токов играет специфичная для графена спинорная структура волновых функций. Также было бы интересно изучить функцию распределения кондактанса неупорядоченной графеновой сверхрешетки и сравнить ее с аналогичной функцией для обычной (недираковской) одномерной неупорядоченной решетки».

4) Протогенов Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института прикладной физики РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает «стремление автора максимально использовать для решения поставленных задач аналитические методы, что, несомненно, относится к достоинствам диссертации». А.П. Протогенов полагает, что полученные в работе результаты являются важными и могут быть «полезными при анализе функционирования различных электронных устройств на базе двумерных и квазидвумерных материалов». Отзыв не содержит замечаний.

5) Тарасенко Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает несомненную актуальность диссертации, интерес полученных результатов «как для фундаментальной науки, так и для прикладных разработок в области электроники и оптоэлектроники». С.А. Тарасенко считает, что работы соискателя, опубликованные в авторитетных международных научных журналах, «вносят вклад в развитие

физики конденсированного состояния». Отзыв не содержит замечаний.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные. В отзывах, содержащих замечания, отмечается, что последние не влияют на положительную в целом оценку работы и не снижают ценности защищаемой диссертации. Во всех отзывах делается вывод, что Е.С. Азарова заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью в научном сообществе; наличием публикаций по теме диссертационного исследования; тематической близостью их научных исследований и диссертационной работы соискателя; способностью определить ее научную и практическую значимость.

В частности, ведущая организация – МГУ им. Н.П. Огарёва – известная научно-образовательная организация в области физики полупроводниковых наноструктур и наноэлектроники. Ее сотрудниками являются такие специалисты в областях, близких к теме диссертационного исследования Е.С. Азаровой, как А.М. Зюзин (составитель отзыва ведущей организации), Е.Н. Гришанов, М.А. Пятаев и др.

Официальный оппонент Кудасов Юрий Бориславович – высококвалифицированный специалист в области физики конденсированного состояния и автор научных работ, близких по тематике к исследованиям соискателя (h-индекс: 12 (Web of Science)).

Официальный оппонент Свинцов Дмитрий Александрович – заведующий лабораторией оптоэлектроники двумерных материалов МФТИ, в которой теоретически и экспериментально исследуются для приложений в оптоэлектронике структуры на основе графена – соединения, являющегося основным объектом диссертационного исследования Е.С. Азаровой. Д.А. Свинцов также имеет ряд публикаций, близких по тематике к диссертационной работе соискателя (h-индекс: 13(Web of Science)).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

выполнен теоретический анализ электронных спектров и транспортных

свойств многобарьерных структур на основе щелевых дираковских материалов.

На основе решения уравнения дираковского типа для огибающей функции, использования формализма матрицы переноса, теории возмущений, метода стационарной фазы, а также численных методов:

впервые получен электронный спектр дираковских частиц в периодической структуре на основе графена с неоднородной щелью и кусочно-постоянным потенциалом;

впервые получено аналитическое выражение для обратной длины локализации в слабо неупорядоченных щелевых графеновых сверхрешетках, определены условия появления делокализационных резонансов, исследована их устойчивость в зависимости от типа беспорядка и его интенсивности;

впервые рассчитан спин- и долинно зависимый сдвиг Гуса-Хенхен в щелевом графене и силицене при отражении электронных пучков от границы неоднородности, а также при прохождении через потенциальный, в т. ч. и ферромагнитный, барьер;

впервые определен энергетический спектр и рассчитаны персистентные токи электронов проводимости в одномерных нанокольцах Ааронова-Бома из щелевых дираковских материалов; выявлено влияние дефектов на электронную структуру и токи.

Доказано, что

1. Электронный спектр сверхрешетки на основе графена с *периодически модулированной* энергетической щелью и кусочно-постоянным электростатическим потенциалом становится бесщелевым, начиная с определенного значения приложенного потенциала (являющегося порогом для образования дираковских точек).

2. В слабо неупорядоченной многобарьерной структуре на основе щелевой модификации графена с флуктуациями межбарьерной области (или ширины барьера) существуют *точные* (устойчивые к возрастанию степени беспорядка) делокализационные резонансы Фабри-Перо; делокализационные резонансы, обусловленные флуктуациями высоты барьеров, являются *приближенными*. Для структур с однородной щелью и флуктуирующей высотой барьеров резонансные условия могут быть выполнены при наклонном падении, в то время как в структурах

с неоднородной щелью делокализация возможна только для нормально падающих частиц.

3. В структурах на основе щелевых дираковских материалов смещение Гуса-Хенхен электронного пучка происходит в условиях не только полного, но и частичного отражения от интерфейса.

4. Наличие неоднородности в графеновом (силициновом) кольце Ааронова-Бома приводит к антикроссингу уровней, следствием чего является сглаженность зависимости персистентного тока от магнитного потока. Во внешнем поперечном электрическом поле персистентный ток неоднородного силицинового кольца не является гладкой функцией магнитного потока. В кольцах Ааронова-Бома из щелевого графена персистентные токи электронов проводимости определяются несколькими *нижними* уровнями зоны вблизи щели и практически не зависят от верхней части спектра, но при высокой степени заселенности зоны не чувствительны к наличию дефекта.

Введено понятие *контактной точки* в энергетическом спектре сверхрешетки на основе графена.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Результаты выполненного исследования являются важными для понимания особенностей электронного транспорта через различные барьерные структуры на основе щелевых дираковских материалов, для оценки влияния на транспорт неупорядоченности, а также, в ряде случаев, – спиновой и долинной поляризаций носителей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Полученные результаты могут быть полезными при анализе функционирования электронных приборов на основе графена и других дираковских материалов (транзисторы, сенсоры, спиновые и долинные сплиттеры...).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность полученных результатов диссертационного исследования и их обоснованность обеспечивается использованием проверенных методов теоретической физики; выбором внутренне непротиворечивых физических моделей, учитывающих основные свойства исследуемых систем; оптимальным подбором

параметров, согласующихся с экспериментальными и расчетными данными, имеющимися в литературе; а также проведением численных расчетов с применением предельных переходов для получения уже известных результатов других авторов в рамках рассматриваемых моделей.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в различных научно-образовательных и научно-исследовательских организациях, среди которых можно выделить Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (гор. Нижний Новгород), Институт физики микроструктур РАН (гор. Нижний Новгород), Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (гор. Саранск), Волгоградский государственный социально-педагогический университет (научно-учебная лаборатория физики низкоразмерных систем) (гор. Волгоград), Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (гор. Новосибирск), МГУ им. М.В. Ломоносова (гор. Москва), Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (гор. Санкт-Петербург), Институт физики твердого тела РАН (гор. Черноголовка), Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН (гор. Черноголовка), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (гор. Красноярск), Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (гор. Москва). Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы при анализе функционирования электронных приборов на основе графена и других дираковских материалов (транзисторы, сенсоры, спиновые и долинные сплиттеры).

Личный вклад соискателя является определяющим в получении основных результатов диссертационной работы на всех ее этапах. Определяющим является участие соискателя в решении теоретических задач и в написании программного комплекса для проведения численных экспериментов, реализация которых и непосредственные расчёты проводились соискателем самостоятельно. Совместно с научным руководителем проводилось обсуждение и интерпретация результатов расчетов, а также подготовка работ к печати. Автор участвовал в апробации результатов исследования, лично представляя доклады на конференциях.

Диссертационный совет отмечает, что диссертация Азаровой Е.С. соответствует паспорту научной специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, и представляет собой завершённую научно-

квалификационную работу, содержащую новые и оригинальные результаты, относящиеся к решению актуальной научной задачи по исследованию особенностей электронного транспорта и электронных свойств периодических и слабо неупорядоченных барьерных структур на основе щелевых дираковских материалов. Диссертация Азаровой Е.С. вносит вклад в развитие физики конденсированного состояния и отвечает соответствующему требованию к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842.

С учетом вышесказанного установлено, что диссертация Азаровой Е.С. соответствует всем критериям и требованиям Раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

На заседании 27.11.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Азаровой Е.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (01.04.07 – физика конденсированного состояния), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против 0 (нет), недействительных бюллетеней 1.

Председатель

диссертационного совета



Чупрунов Евгений Владимирович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Марычев Михаил Олегович

Дата оформления Заключения 27.11.2019 г.