



МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени
М.В. ЛОМОНОСОВА
(МГУ)

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Тел.: 939-10-00, 203-65-65
Факс: 939-01-26

Романова "Утверждаю"
Проректор Московского государственного
университета имени М.В.Ломоносова
профессор А.А. Федягин
01 МАРТА 2017 г.

На № _____

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Романовой Таисии Андреевны на тему:
«Транспортные, магнитотранспортные и сверхпроводящие свойства трехмерных
топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности
01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Экспериментальное и теоретическое исследование свойств топологических изоляторов является одной из наиболее быстро и динамично развивающихся областей современной физики конденсированного состояния. В данном классе материалов ввиду специфики их зонной структуры формируются поверхностные электронные состояния, характеризующиеся дираковским законом дисперсии. Кроме того, подавление рассеяния назад должно приводить к чрезвычайно высоким значениям подвижности носителей заряда при транспорте вдоль поверхности. С другой стороны, реализация всех преимуществ топологических изоляторов в реальных устройствах предполагает, что объем полупроводника вносит малый вклад в общую проводимость. Однако в реальных топологических изоляторах это не так, и объемная проводимость, как правило, практически полностью шунтирует поверхностную. В связи с этим выделить вклад поверхностных состояний в транспортные эффекты является чрезвычайно нетривиальной

задачей, решению которой и посвящена диссертация Т.А. Романовой, что определяет актуальность работы.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, пяти оригинальных глав, заключения с основными выводами работы, списка опубликованных работ по теме диссертации и списка используемой литературы. Материал диссертации изложен на 127 страницах и содержит 53 рисунка, 2 таблицы и 97 наименований цитируемых источников.

Во введении приводится обоснование актуальности исследований, сформулирована цель работы, поставлены конкретные задачи. Обсуждается научная новизна, практическая значимость работы, приведены сведения об апробации научных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации представляет собой обзор литературы по теме работы. Рассмотрены базовые теоретические концепции нового класса топологических материалов, приводятся свойства материалов, в которых предсказано и экспериментально подтверждено наличие топологически нетривиальных состояний и обсуждаются возможности их практического применения.

Во второй главе работы приведено подробное описание получения монокристаллов на основе теллурида висмута и селенида висмута, которые исследовались в настоящей работе. Представлены результаты характеризации полученных образцов, дано описание экспериментальных установок и методик измерений. Также обсуждаются особенности подготовки образцов к магнитотранспортным измерениям при низких температурах. Монокристаллические образцы с зеркально-гладкими поверхностями были получены из выращенных слитков путем скальвания вдоль базисной плоскости (001). Однофазность и высокое структурное совершенство кристаллов были подтверждены рентгеноструктурным и элементным анализом. Первичная характеризация показала, что полученные монокристаллы имеют различный тип и плотность заряда $10^{17} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Исследование температурной зависимости сопротивления и эффекта Холла показало, что легирование Cu в случае Bi_2Se_3 и Sn в случае Bi_2Te_3 привело к снижению концентрации объёмных носителей заряда и неметаллическому поведению сопротивления в этих монокристаллах, т.е. позволило приблизиться к трёхмерному диэлектрику. Также были получены монокристаллы $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$, интеркалированные медью, с относительно высокой концентрацией электронов $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, необходимые для исследования сверхпроводящих свойств 3D топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута.

В заключительной части главы представлены экспериментальные методики магнитотранспортных измерений, а также обсуждаются особенности работы с образцами халькогенидов висмута, рассмотрены различные способы изготовления электрических

контактов к образцам, в том числе стабильные прижимные индивидуальные контакты с сопротивлением ~ 1 Ом.

Третья глава работы посвящена исследованиям транспортных и магнитотранспортных свойств халькогенидов висмута в полях до 9 Тл.

Показано, что магнитотранспорт в исследуемых материалах зависит только от перпендикулярной компоненты магнитного поля, что является ярким признаком двумерности электронного газа, ответственного за появление осцилляций Шубникова – де Гааза. В то же время при высокой концентрации носителей заряда в легированных медью материалах может наблюдаться транспорт, обусловленный несколькими параллельными двумерными проводящими каналами. Делается предположение, что в первом случае «двумерность» связана с поверхностными состояниями, а во втором – с несколькими соединенными параллельно слоями, соединенными ван-дер-ваальсовской связью.

Кроме того, в работе сделана попытка определить фазу Берри и сделано предположение, что она может быть отличной от нуля, что может быть указанием на наличие дираковских фермионов.

Четвертая глава работы посвящена изучению магнитотранспорта в сильных магнитных полях до 20 Тл при температурах до 0.3 К. Из наиболее ярких результатов, описанных в данной главе, следует особо отметить наблюдение квантованного холловского сопротивления, причем расстояние между ступеньками постоянно для различных уровней Ландау и равно e^2/h на каждый квазидвумерный канал толщиной около 1 нм. Этот результат может быть одним из первых, если не первым наблюдением квантового эффекта Холла на трехмерном образце, представляющем собой стопку двумерных.

Помимо вышеуказанного, необходимо обратить внимание на существование двумерных и трехмерных осцилляций Шубникова – де Гааза в сильно легированных образцах.

В пятой главе работы делаются попытки оценить фазу Берри в рассматриваемых материалах на основе анализа фазы шубниковских осцилляций. Проведенная оценка фазы Берри дает значение, близкое к π . Показано, что измеренное значение фазы Берри не зависит от направления магнитного поля.

Наконец, в шестой главе диссертации исследовалась сверхпроводимость в $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$. Основной вывод этой части работы заключается в том, что этот полупроводник можно рассматривать как массивный сверхпроводник, состоящий из сверхпроводящих слоев с эффективной толщиной около 50 нм.

В заключении приведены основные результаты работы.

Результаты исследований, проведённых Т.А. Романовой, представляют несомненный практический интерес. Они доказывают принципиальную возможность использования топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута для создания новых электронных устройств, в том числе квантовых компьютеров. Полученные в работе результаты рекомендуются к использованию в следующих организациях: МГУ им. М.В. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), и в других институтах РАН и организациях Министерства образования и науки.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать ряд вопросов и замечаний:

1) Интерпретация полученных данных по фазе Берри является неоднозначной. Действительно, производится экстраполяция полученных данных для веерных диаграмм уровней для значений номера уровня Ландау от 15-20 к нулю. Точность такой экстраполяции достаточно сомнительна. Кроме того, при учете полевой зависимости монотонной части магнитосопротивления, которая аппроксимируется полиномом четвертого порядка, возникает неоднозначность в определении положения экстремума осцилляций, что, в свою очередь, может привести к неоднозначности определения величины фазы Берри.

2) Не вполне понятна аргументация автора, когда существование 2-мерных и 3-мерных шубниковских осцилляций рассматривается в рамках модели, в которой образец представляется в виде набора параллельных двумерных проводящих каналов. Откуда тогда берется трехмерность?

3) Известно, что в тонких слоях топологических изоляторов взаимодействие поверхностей приводит к распаду дираковских состояний. Не вполне понятно как этот факт может быть совмещен с моделью автора работы, в рамках которой образец представляет собой набор двумерных пластин, соединенных слабой ван-дер-ваальсовой связью.

4) В работе есть ряд стилистических неточностей, в частности, на стр.6 (строки 1-2), на стр.11-12 (последняя и первая строки), а также ряд других.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Диссертация Т.А. Романовой является законченной научно-квалификационной работой и содержит решение задач в области исследования транспортных свойств топологических изоляторов, что имеет важное значение для развития физики полупроводников. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации, научные

результаты диссертации опубликованы в статьях автора в рецензируемых научных изданиях. В целом, диссертация Т.А. Романовой удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сама автор заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад Т.А. Романовой заслушан на заседании кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ. Отзыв подготовлен старшим преподавателем, к.ф.-м.н. А.В. Галеевой и утвержден на заседании кафедры 14 февраля 2017 г., протокол №1.

Старший преподаватель кафедры
общей физики и физики конденсированного состояния
физического факультета МГУ

к.ф.-м.н.

Александра Викторовна Галеева

Адрес: Ленинские горы, д.1, стр.2, Москва 119991

Тел. (495)-939-11-51

E-mail: galeeva@physics.msu.ru

А.В. Галеева

Заместитель заведующего кафедрой
общей физики и физики конденсированного состояния
физического факультета МГУ

доцент, к.ф.-м.н.

Людмила Алексеевна Скипетрова

Л.А. Скипетрова

Адрес: Ленинские горы, д.1, стр.2, Москва 119991

Тел. (495)-939-20-03

E-mail: lskip@mig.phys.msu.ru

Список работ сотрудников ведущей организации по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Galeeva A.V., Krylov I.V., Drozdov K.A., Knjazev A.F., Kochura A.V., Kuzmenko A.P., Zakhvalinskii V.S., Danilov S.N., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. **Electron energy relaxation under terahertz excitation in (Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ Dirac semimetals** // *Beilstein journal of nanotechnology*, том 8, с. 167-171 (2017).
2. A.V. Galeeva, S.G. Egorova, V.I. Chernichkin, M.E. Tamm, L.V. Yashina, V.V. Rumyantsev, S V Morozov, H Plank, S N Danilov, L I Ryabova and D.R. Khokhlov. **Manifestation of topological surface electron states in the photoelectromagnetic effect induced by terahertz laser radiation** *Semiconductor Science and Technology*, V. 31, No. 9, 095010 (2016).
3. Галеева А.В., Егорова С.Г., Черничкин В.И., Рябова Л.И., Данилов С.Н., Никорич А.В., Хохлов Д.Р. **Терагерцевая фотогенерация в PbTe(Ga), индуцированная магнитным полем** Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики.. Т. 104. № 1-2. С. 64-67, (2016).
4. Oveshnikov L.N., Kulbachinskii V.A., Davydov A.B., Aronzon B.A., Rozhansky I.V., Averkiev N.S., Kugel K.I., Tripathi V. **Berry phase mechanism of the anomalous Hall effect in a disordered two-dimensional magnetic semiconductor structure**, *Scientific reports (Nature)*, том 5, с. 17158-17158, (2015).
5. S.G. Egorova, V.I. Chernichkin, L.I. Ryabova, E.P. Skipetrov, L.V. Yashina, S.N. Danilov, S.D. Ganichev , D.R. Khokhlov **Detection of highly conductive surface electron states in topological crystalline insulators Pb_{1-x}Sn_xSe using laser terahertz radiation** *Scientific Reports* 5, Article number: 11540 (2015).
6. S.G. Egorova ; V. I. Chernichkin ; A.O. Dudnik ; V.A. Kasiyan ; L. Chernyak ; S.N. Danilov, L.I. Ryabova, D.R. Khokhlov **Discrimination of Conductive Surface Electron States by Laser Terahertz Radiation in PbSe —A Base for Pb_{1-x}Sn_xSe Topological Crystalline Insulators.** *IEEE Transactions on terahertz science and technology*, v. 5, Iss. 4, pp. 659-664 (2015).
7. Рябова Л.И., Хохлов Д.Р. **Терагерцевая фотопроводимость и нетривиальные локальные электронные состояния в легированных полупроводниках на основе теллурида свинца.** Успехи физических наук.. Т. 184. № 10. С. 1033-1044 (2014).
8. Trajic J., Romcevic N., Romcevic M., Stojanovic D., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. **Galvanomagnetic and optical properties of chromium doped PbTe** *Journal of Alloys and Compounds..* v. 602. pp. 300-305. (2014).
9. Heon-Jung Kim, Ki-Seok Kim, J-F Wang, Kulbachinskii V.A., Ogawa K., Sasaki M., Ohnishi A., Kitaura M., Y-Y Wu, **Topological Phase Transitions Driven by Magnetic Phase Transitions in Fe_xBi₂Te₃ (0 < x < 0.1) Single Crystals** *Physical Review Letters*, том 110, с. 136601 (2013).