

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию РОМАНОВОЙ Таисии Андреевны «ТРАНСПОРТНЫЕ, МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ТРЕХМЕРНЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДОВ ВИСМУТА», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния)

Актуальность. В последнее время в физике конденсированного состояния имеется огромный интерес к новым веществам – трехмерным топологическим изоляторам. Бум теоретических и экспериментальных работ в этой области начался после предсказания в 2009 г., что соединения Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , Bi_2Se_3 должны быть трёхмерными топологическими изоляторами. В настоящее время теоретически хорошо поняты ожидаемые свойства топологических изоляторов, однако, их экспериментальное обнаружение существенно отстает от теории. Это связано с рядом таких экспериментальных трудностей как существование объемных проводящих состояний, наличие нескольких конусов поверхностных состояний, тригональные искажения линейного спектра поверхностных состояний и т.д. Также теоретически предсказано существование трёхмерных топологических сверхпроводников, однако экспериментальное обнаружение таких веществ пока не осуществлено.

Халькогениды висмута Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 обладают достаточно большой объемной щелью (15 – 30 К) и при легировании переходят в сверхпроводящее состояние при температурах в несколько Кельвин. Спектр поверхностных состояний состоит из одного конуса. Таким образом, халькогениды висмута являются удобными соединениями для экспериментального исследования транспортных свойств при низких температурах и сильных магнитных полях.

Таким образом, **актуальность** работы не вызывает сомнения.

Новизна и достоверность. В диссертационной работе впервые получен ряд принципиально важных новых экспериментальных результатов, имеющих как фундаментальное значение для современной физики конденсированных сред.

В третьей главе диссертации представлены исследования высококачественных монокристаллов трёхмерных топологических изоляторов $\text{Bi}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Se}_3$ в магнитном поле. Впервые обнаружены осцилляции Шубникова-де Гааза, которые имеют вид, характерный для

двумерных носителей, хотя измерение константы Холла дает объемную концентрацию носителей около 10^{20} см^{-3} .

В четвертой главе изложены результаты магнитотранспортных измерений в сильных магнитных полях и температуре 0.3 К для сильно легированном медью монокристалла Bi_2Se_3 . Впервые обнаружены осцилляции холловского сопротивления, амплитуда которых соответствует величине кванта сопротивления, h/e^2 , на один структурный слой, состоящий из 5 атомарных плоскостей.

В пятой главе проводится анализ осцилляций Шубникова-де Гааза в монокристаллах $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ в перпендикулярном и наклонном магнитных полях. Из полученных данных извлечена фаза Берри, значение которой оказывается близкой к 0.5 – значению, предсказанному для квазичастиц на поверхности трёхмерных топологических изоляторов.

В шестой главе представлены результаты измерений верхнего критического поля в легированных медью монокристаллах халькогенида висмута. Проведен анализ угловой зависимости верхнего критического поля. Обнаружено, что измеренная угловая зависимость верхнего критического поля хорошо описывается расширенной моделью Тинкхама для обычной сверхпроводящей тонкой пленки.

Этим определяется **научная новизна** работы.

Достоверность представленных экспериментальных данных гарантируется используемыми известными методиками магнитотранспортных измерений. Поэтому не возникает сомнений в **достоверности** полученных результатов.

Научная и практическая значимость Научная значимость диссертации состоит в ряде новых экспериментальных результатов, полученных впервые. Практическая значимость диссертации заключается в разработке методики для выращивания массивных монокристаллов трёхмерных топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута с различной плотностью носителей заряда на базе модифицированного метода направленной кристаллизации расплава медленным охлаждением в тепловом градиентном поле. Исходя из вышесказанного, можно с уверенностью сказать, что научная и практическая значимость всех результатов диссертации высока и несомненна.

Развитая в диссертации методика и используемые экспериментальные подходы могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики конденсированных сред, в том числе, в области изучения транспортных свойств трёхмерных топологических изоляторов (ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ИС РАН, МГУ, ИФП СО РАН, ИФТТ РАН, ИРЭ РАН, ИФМ УрО РАН и др.).

Диссертация Т. А. Романовой написана понятным языком и содержит достаточное количество иллюстраций. Экспериментальные данные чётко представлены в иллюстрациях. В диссертации четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны использованные экспериментальные методы, и подробно обсуждены полученные результаты.

Замечания. По диссертации следует высказать несколько вопросов и замечаний, не имеющих принципиального характера:

- 1) Для понимания экспериментальных результатов главы 3 было бы полезно разъяснить физическую причину разного поведения продольной проводимости с температурой в $\text{Bi}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Se}_3$ (Рис. 3.1 на стр. 64): для $\text{Bi}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_3$ она немонотонная, а для $\text{Bi}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Se}_3$ – монотонная.
- 2) На стр. 82 зависимость холловского сопротивления от магнитного поля интерпретируется как ступеньки квантового эффекта Холла структуры из слабосвязанных двумерных слоев (см. ур. 4.5). При этом утверждается, что скачок между холловскими плато равный 0.027 Ом соответствует числу эффективных двумерных слоев во всем образце, которое равно 52000 !). При таком маленьком значении скачка и в ситуации, когда ширина плато меньше или равна ширине области перехода между плато (см. вставку к рис. 4.3 на стр. 78), такая интерпретация кажется необоснованной. Казалось, что бы такое поведение скорее нужно назвать просто осцилляциями. Для изучения действительно ли возникает квантование холловской проводимости нужно было бы исследовать образцы существенно меньшей толщины и при более низких температурах.
- 3) В главе 5 с помощью осцилляций Шубникова-де Гааза исследуется фаза Берри для образцов №3, №4 и №5. Для трех образцов из данных в перпендикулярном поле находятся значения фазы равные 0.5, 0.45, 0.6, соответственно. Теория [см. Mikitik, Sharlai, Phys. Rev. B85,033301 (2012)] утверждает, что значение фазы Берри для топологических изоляторов при измерении в перпендикулярном магнитном поле равно строго 0.5. Хотелось бы понять, с чем связано расхождение экспериментальных данных с теорией. Также в главе 5 приведены значения фазы Берри, извлеченные из измерений в наклонном поле. Удивительным образом, получаются те же значения, что и для перпендикулярного поля. Этот экспериментальный факт находится, как кажется, в противоречие с теорией, в которой значение квазиклассической фазы может зависят от параллельной компоненты магнитного поля. Полезно было бы обсудить соотношение между экспериментальными результатами и теорией Микитика и Шарлай.

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на достаточно высоком научном уровне.

Научные положения и результаты диссертации достаточно аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 3 научных работах в отечественных рецензируемых журналах (ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Кристаллография), докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Т. А. Романовой является законченным исследованием и содержит принципиально новые важные результаты. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Ее автор, безусловно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау

Российской академии наук

Бурмистров Игорь Сергеевич



22 февраля 2017 г.

142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. акад. Семенова, 1а

Тел. (+7 495) 702-93- 17.

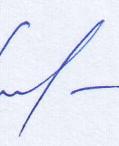
e-mail: burmi@itp.ac.ru

Подпись Бурмистрова И.С. заверяю:

ученый секретарь

ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН

к.х.н. С.А. Крашаков



22 февраля 2017 г.

Список основных работ д.ф.-м.н. И.С. Бурмистрова по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. I.S. Burmistrov, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin, *Enhancement of the Critical Temperature of Superconductors by Anderson Localization*, Phys. Rev. Lett. 108, 017002 (2012);
2. E.J. König, P.M. Ostrovsky, I.V. Protopopov, I.V. Gornyi, I.S. Burmistrov, A.D. Mirlin, *Interaction and disorder effects in three-dimensional topological insulator thin films*, Phys. Rev. B 88, 035106 (2013);
3. A. Saha, Y. Gefen, I.S. Burmistrov, A. Shnirman, A. Altland, *A quantum dot close to Stoner instability: The role of the Berry phase*, Ann. Physics, 327(10), 2543-2559 (2012);
4. E.J. König, P.M. Ostrovsky, I.V. Protopopov, I.V. Gornyi, I.S. Burmistrov, A.D. Mirlin, *Half-integer quantum Hall effect of disordered Dirac fermions at a topological insulator surface*, Phys. Rev. B 90, 165435 (2014);
5. I.S. Burmistrov, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin, *Superconductor-insulator transitions: Phase diagram and magnetoresistance*, Phys. Rev. B 92, 014506 (2015);
6. E.J. König, A. Levchenko, I.V. Protopopov, I.V. Gornyi, I.S. Burmistrov, A.D. Mirlin, *Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition in homogeneously disordered superconducting films*, Phys. Rev. B 92, 214503 (2015);
7. Y. Tupikov, A.Yu. Kuntsevich, V.M. Pudalov, I.S. Burmistrov, *Temperature derivative of the chemical potential and its magnetooscillations in two-dimensional system*, Письма в ЖЭТФ, 101 (2), 131-135 (2015);
8. P.D. Kurilovich, V.D. Kurilovich, I.S. Burmistrov, *Indirect exchange interaction between magnetic impurities in the two-dimensional topological insulator based on CdTe/HgTe/CdTe quantum wells*, Phys. Rev. B 94, 155408 (2016).