

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Романовой Таисии Андреевны

«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.

В диссертационной работе Т.А. Романовой представлены результаты экспериментального исследования транспортных свойств трехмерных топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута, которое включает разработку методов роста монокристаллов теллуридов и селенидов висмута с различным типом проводимости и концентрацией носителей заряда, изучение параметров поверхностного и объемного электронного транспорта в сильных магнитных полях, а также анализ микроскопических характеристик носителей заряда в этих материалах с нетривиальной топологией зонной структуры.

Особый интерес к изучению полупроводниковых систем на основе халькогенидов висмута, выбранных автором в качестве объекта исследования диссертационной работы, связан с недавним открытием состояния топологического изолятора – одного из самых ярких достижений физики конденсированного состояния третьего тысячелетия. Действительно, для теллуридов и селенидов висмута, традиционно используемых в качестве термоэлектрических материалов с высокой добротностью, относительное положение зон с различной симметрией вблизи краев энергетической щели оказывается инвертированным в нечетном числе точек зоны Бриллюэна, инвариантных по отношению к обращению времени. В условиях нетривиальной топологии зонной структуры на границе с вакуумом возникают поверхностные электронные состояния с линейной зависимостью энергии от импульса, которые ведут себя как безмассовые частицы. При этом спин и импульс поверхностных электронов в условиях сильного спин-орбитального взаимодействия жестко связаны, что обеспечивает бездиссипативный ток за счет подавления рассеяния носителей заряда на немагнитных дефектах поверхности. В такой ситуации, научная проблематика диссертационной работы Т.А. Романовой, охватывающая оптимизацию методов роста монокристаллов топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута, исследование процессов электронного транспорта и оценку микроскопических параметров объемных и поверхностных носителей заряда в этих материалах, является несомненно **актуальной** и важной как для оптимизации технологических приемов роста и легирования топологических изоляторов, так и для развития

теоретического аппарата для описания механизмов переноса заряда и спина в этом новом квантовом состоянии.

Одна из основных проблем, возникающих при экспериментальном исследовании поверхностных состояний в халькогенидах висмута, связана с большим количеством собственных дефектов, образующихся при их синтезе. Вырождение полупроводникового состояния смещает энергию Ферми в разрешенную зону (проводимости или валентную), что приводит к заметному вкладу объемных носителей заряда и затрудняет надежную идентификацию параметров поверхностных состояний. В этой связи не вызывает сомнений корректность постановки научной задачи диссертационной работы Т.А. Романовой, направленной на совершенствование технологии выращивания монокристаллов данных материалов с изучением возможностей управления концентрацией носителей заряда при изменении соотношения исходных компонентов или с помощью легирования примесями. В качестве основного экспериментального метода автором выбрана методика исследования магнитотранспортных свойств выращенных монокристаллов топологических изоляторов в сильных магнитных полях (до 20 Тл) и при сверхнизких температурах (вплоть до 0,3 К). В частности, в работе детально изучены квантовые осцилляции Шубникова – де Гааза в исследуемых образцах при различных ориентациях магнитного поля относительно базисной плоскости (001). Анализ амплитуды и частотного спектра осцилляций позволил определить эффективную размерность электронной подсистемы и параметры поверхности Ферми, а также – из сопоставления с результатами холловских измерений – выполнить расчет основных характеристик (циклотронной массы, концентрации и подвижности) носителей заряда. С другой стороны, выполненные автором оценки геометрической фазы (фазы Берри) для поверхностных состояний из фазового анализа квантовых осцилляций в легированном медью селениде висмута показали, что ее величина близка к теоретическому значению $\gamma = \pi$, предсказываемому для двумерных дираковских фермионов с линейным законом дисперсии. При этом тщательная проработка методических вопросов, связанных с аккуратной характеристикой исследуемых образцов топологических изоляторов при помощи рентгеноструктурного и элементного анализа, а также с исследованием их магнитотранспортных свойств в нормальном и сверхпроводящем состоянии, наряду с подробным анализом и систематизацией полученных данных определяют **достоверность** результатов, полученных в диссертационной работе Т.А. Романовой.

Важным научным достижением диссертационной работы являются разработка методики для выращивания монокристаллов топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sn}_x$, Bi_2Se_3 , $\text{Bi}_{2-x}\text{Se}_3\text{Cu}_x$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ на базе модифицированного метода Бриджмана (направленная кристаллизация расплава медленным охлаждением в тепловом градиентном поле) и систематическое исследование

магнитотранспортных свойств этих соединений с различным типом проводимости и концентрациями носителей заряда. Автор акцентирует внимание на сопоставлении различных способов компенсации разнообразных структурных дефектов и вакансий. В частности, при росте монокристаллов теллурида висмута анализируется влияние смещенной стехиометрии ($\text{Bi}_{2-x}\text{Te}_{3+x}$), а при легировании Bi_2Se_3 медь вводится двумя различными способами с замещением ионов висмута и образованием акцепторного дефекта ($\text{Bi}_{2-x}\text{Se}_3\text{Cu}_x$), либо интеркаляцией меди в междоузлия, где медь выступает в роли донорной примеси ($\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$). При этом последовательная реализация программы экспериментальных исследований позволила: а) впервые идентифицировать вклад двумерных носителей заряда в квантовых осцилляциях Шубникова–де Гааза для топологических изоляторов $\text{Bi}_{2-x}\text{Se}_3\text{Cu}_x$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ при высоких (до 10^{20} см^{-3}) концентрациях носителей заряда; б) обнаружить квантование холловского сопротивления в легированном медью монокристалле Bi_2Se_3 и в) выполнить оценку параметров сверхпроводящего состояния в $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$. В последнем случае автору удалось показать, что объемный монокристалл $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ можно рассматривать как массивный сверхпроводник, состоящий из сверхпроводящих слоев с эффективной толщиной около 50 нм, и, таким образом, исключить топологическую природу сверхпроводимости в данном соединении. В целом, сопоставление оригинальных результатов с имеющимися литературными данными не оставляет сомнений в **научной новизне** положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе Т.А. Романовой.

Результаты диссертационной работы изложены на 127 страницах машинописного текста. Диссертация состоит из введения, шести глав (обзора литературы, главы с описанием методов роста и характеристики монокристаллов и экспериментальных методик, четырех глав с оригинальными результатами исследований и их обсуждением), заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы из 97 наименований. Работа включает 53 рисунка и 2 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и научные задачи работы, аргументирована научная новизна исследований, обоснованы практическая ценность и научная значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведена информация о личном вкладе автора, а также об апробации результатов работы и публикациях по теме диссертации.

В **первой главе** (обзоре литературы) рассмотрены базовые теоретические представления о новом классе материалов – топологических изоляторах. Автор приводит известные данные о кристаллической и электронной структуре «сильных» топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута, а также результаты экспериментов, доказывающих наличие топологически нетривиальных состояний в этих соединениях. В

заключительной части главы обсуждаются возможности и перспективы практического применения топологических изоляторов.

Во **второй главе** приведено подробное описание технологии получения монокристаллов Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sn}_x$, Bi_2Se_3 , $\text{Bi}_{2-x}\text{Se}_3\text{Cu}_x$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ методом направленной кристаллизации расплава медленным охлаждением в тепловом градиентном поле (методом Бриджмана). Детально рассмотрены результаты характеристики полученных образцов, включающие данные об их структуре, составе и морфологии. Из предварительных измерений удельного и холловского сопротивления показано, что выращенные монокристаллы существенно различаются по типу проводимости и концентрации объемных носителей заряда ($10^{17}\div 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Автором установлено, что легирование медью Bi_2Se_3 и оловом Bi_2Te_3 позволяет снизить концентрацию объемных носителей заряда и, таким образом, приблизиться к трёхмерному диэлектрику. В последнем параграфе главы представлено описание экспериментальных методик магнитотранспортных измерений, а также особенностей измерения гальваномагнитных свойств исследуемых образцами халькогенидов висмута.

Третья глава посвящена изучению транспортных и магнитотранспортных свойств легированных монокристаллов селенида и теллурида висмута в магнитных полях до 9 Тл, включающему исследованию квантовых осцилляций Шубникова – де Гааза. Автор проводит сопоставление параметров квантовых осцилляций в образцах с различным типом проводимости (n-типом в случае $\text{Bi}_{2-x}\text{Se}_3\text{Cu}_x$ и p-типом в случае $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sn}_x$). На основе анализа угловых зависимостей частот квантовых осцилляций в работе делается обоснованный вывод о том, что проводимость по двумерным состояниям реализуется только в случае легированного селенида висмута, в то время как для $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sn}_x$ основной вклад в проводимость вносят объемные носители заряда из валентной зоны. В выводах главы автор обращает особое внимание на отличную от нуля фазу Берри и ее возможную связь с дираковскими фермионами, тем самым обосновывая необходимость дополнительных исследований квантовых осцилляций Шубникова – де Гааза в сильных магнитных полях.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования квантовых осцилляций сопротивления в квазидвумерных слоях монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ в сильных магнитных полях (до 20 Тл) при сверхнизких температурах (до 0,3 К). Основное внимание уделяется анализу магнитотранспортных свойств систем с высокими концентрациями носителей заряда ($10^{19}\div 10^{20} \text{ см}^{-3}$), в которых возможно сосуществование поверхностных топологически нетривиальных состояний и сверхпроводимости. В частности, в сильно легированном медью селениде висмута обнаружены квантовые осцилляции сопротивления, обусловленные электронным транспортом по двумерным проводящим каналам с эффективной концентрацией 10^{13} см^{-2} . Для монокристалла $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ впервые обнаружен «объемный» (или мультислойный) квантовый эффект Холла, обусловленный электронным транспортом через

множество параллельных проводящих двумерных каналов в объемном монокристалле. При этом оценки эффективной массы и времени релаксации двумерных носителей заряда из анализа температурных зависимостей амплитуды квантовых осцилляций Шубникова – де Гааза показали, что кинетические параметры двумерных проводящих слоев остаются постоянными при изменении концентрации электронов проводимости в объеме почти на порядок (от $2,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $1,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

Пятая глава посвящена экспериментальной оценке фазы Берри в монокристаллах $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ из анализа зависимостей обратного магнитного поля в экстремуме проводимости от индекса уровней Ландау, в том числе – для различных направлений магнитного поля относительно нормали к базисной плоскости (001) монокристаллов. Из сопоставления данных анализа фазового сдвига осцилляций продольной и холловской проводимости для трех образцов показано, что фаза Берри не зависит от направления магнитного поля, а полученные значения $\gamma = (0,5 \pm 0,1)\pi$ оказываются близки к теоретическим. По мнению автора, данное наблюдение однозначно доказывает связь двумерных осцилляций Шубникова – де Гааза с дираковскими фермионами в параллельных проводящих двумерных каналах в $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$.

В шестой главе представлены результаты исследования параметров сверхпроводящего состояния в монокристаллах легированного селенида висмута $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$. Для изучения угловой зависимости верхнего критического поля были измерены полевые зависимости удельного сопротивления в окрестности резистивного сверхпроводящего перехода для различных направлений магнитного поля относительно нормали к базисной плоскости (001) исследуемых монокристаллов. Аппроксимация экспериментальных данных расширенной моделью Тинкхама позволила оценить параметр анизотропии η , как следствие, эффективную толщину сверхпроводящих слоев в образце (50 нм). Таким образом, в работе показано, что монокристалл $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ можно рассматривать как объемный сверхпроводник, состоящий из сверхпроводящих слоев с толщиной, на порядок превышающей поперечный размер двумерного слоя.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

Данные о транспортных свойствах трехмерных топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута, полученные Т.А. Романовой для монокристаллов с различным типом проводимости и концентрацией объемных носителей заряда, создают надежную основу для проверки теоретических подходов к описанию процессов электронного транспорта в новых материалах с нетривиальной топологией зонной структуры. В качестве **основных научных результатов**, полученных в рецензируемой работе, необходимо отметить следующие:

1. Предложен и реализован метод направленной кристаллизации расплава медленным охлаждением в тепловом градиентном поле, позволяющий вырастить высококачественные

монокристаллы Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sn}_x$, Bi_2Se_3 , $\text{Bi}_{2-x}\text{Se}_3\text{Cu}_x$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ с различным типом проводимости и концентрацией носителей заряда.

2. Для легированных топологических изоляторов $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ с концентрацией объемных носителей заряда $\sim 10^{18}-10^{20} \text{ см}^{-3}$ зарегистрированы квантовые осцилляции Шубникова – де Гааза, связанные с двумерными проводящими каналами с эффективными толщинами от 1 до 5 нм.

3. Для монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ получены оценки параметров (эффективной массы, времени релаксации и волнового вектора Ферми) двумерных носителей заряда, значения которых в пределах экспериментальной погрешности остаются постоянными при изменении концентрации электронов проводимости в объеме почти на порядок (от $2,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $1,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

4. Для монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ из анализа фазового сдвига осцилляций продольной и холловской проводимости получены оценки фазы Берри $\gamma=(0,5 \pm 0,1)\pi$, величина которой оказывается близка к теоретическому значению для дираковских фермионов.

5. В результате исследования критических параметров сверхпроводящего состояния в монокристаллах $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_x$ ($T_c \approx 3,4 \text{ К}$) показано, что легированный селенид висмута следует рассматривать как объемный сверхпроводник, состоящий из сверхпроводящих слоев с эффективной толщиной около 50 нм.

Результаты диссертационной работы Т.А. Романовой в достаточной мере обоснованы и могут быть использованы специалистами, проводящими теоретические и экспериментальные исследования электронного транспорта в низкоразмерных электронных системах, а также занимающимися разработкой перспективных устройств и приборов на основе топологических изоляторов. Полученные результаты могут быть рекомендованы к использованию в ФТИ РАН, ФИАН, ИМЕТ РАН, ИТФ РАН, НГУ, МГУ, НИЯУ «МИФИ», НИТУ «МИСиС», а также в ряде других научных организаций.

В целом диссертационная работа Т.А. Романовой представляет собой **законченное научное исследование**, посвященное актуальной проблеме исследования электронного транспорта в топологических изоляторах и имеющее существенное значение для физики конденсированного состояния. Результаты диссертации изложены в 8 печатных работах, включая 3 статьи в отечественных переводных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Sciences и Scopus. Результаты работы Т.А. Романовой неоднократно докладывались на научных симпозиумах и конференциях международного и национального уровня. Основное содержание диссертации полностью отражено в автореферате и опубликованных работах. Личный вклад автора в работу не вызывает сомнений.

В то же время диссертация Т.А. Романовой не лишена ряда недостатков, которые кратко перечислены ниже:

1. В тексте диссертации не обсуждаются дополнительные по отношению к основному рефлексу (0015) особенности, четко идентифицируемые на данных рентгенофазового анализа (рис. 2.8, стр. 43), которые могут указывать на присутствие фаз с нарушенной стехиометрией.

2. Для оценки эффективной толщины двумерного проводящего слоя автор использует отношение эффективных концентраций двумерных и трехмерных электронов проводимости, определенных из квантовых осцилляций Шубникова – де Гааза и холловских измерений, соответственно. Между тем, указанные носители заряда соответствуют различным ветвям электронного спектра, и возможность применения отношения концентраций требует дополнительного обсуждения.

3. При анализе «объемного» квантового эффекта Холла в диссертации не приводятся данные удельного сопротивления ρ_{xx} , которое должно принимать близкие к нулевым значениям в области холловских плато ($\rho_{xx} \approx 0$). Кроме того, детальный анализ данных, приведенных на рис. 4.9, показывает, что наблюдаемое аномальное поведение холловского сопротивления может быть связано с вкладом квантовых осцилляций Шубникова – де Гааза, амплитуда которых монотонно увеличивается с ростом магнитного поля (уменьшением $1/H$).

4. При анализе веерных диаграмм (параграф 5.4) автор не приводит значений погрешности, с которой значение фазы Берри определяется из линейной аппроксимации данных для уровней Ландау с $N > 20$.

5. В формуле 6.2 (стр. 108) для обозначения параметра, определяющего смещение сверхпроводящих слоев и их возможное укорочение, автор использует символ β , ранее введенный для фазы квантовых осцилляций.

6. Несмотря на общий высокий уровень изложения материала диссертации, автору не удалось избежать опечаток и стилистических неточностей в тексте. Так, в условных обозначениях на рис. 2.11 (стр. 46) и таб. 2.1 (стр. 47) перепутана нумерация для монокристаллов $Bi_{2-x}Se_3Cu_x$ и $Bi_2Se_3Cu_x$ (образцы № 3 и 4). На стр.11 можно найти незаконченное предложение «... в классической работе 1937 года, которая лежит [12]», на стр.19 термин «квантовый эффект холла», на стр.32 фразу «объемные свойства ... демонстрируют металлическое поведение», а на стр.47 словосочетание «типичные зависимости первого типа образцов».

Сделанные замечания не снижают **общей высокой положительной оценки** диссертационной работы Т.А. Романовой, содержащей решение важной научной задачи по изучению возможностей управления параметрами поверхностного и объемного электронного транспорта в топологических изоляторах на основе теллуридов и халькогенидов висмута с различным типом легирующей примеси.

Диссертация «Транспортные, магнитотранспортные и сверхпроводящие свойства трехмерных топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута» обладает внутренней целостностью, выполнена на высоком научном уровне, отвечает паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно пп.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года за № 842.

Считаю, что автор диссертационной работы – Романова Таисия Андреевна – безусловно заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

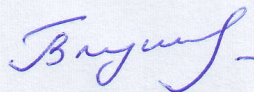
Заведующий лабораторией низких температур

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт общей физики им. А.М.Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН),

доктор физико-математических наук, доцент,

Глушков Владимир Витальевич



27.02.2017

119991, Москва, ГСП-1, ул.Вавилова, д.38

телефон: +7(499)503-8253

факс: +7(499)135-8129

e-mail: glushkov@lt.gpi.ru

Подпись д.ф.-м.н., доцента Глушкова Владимира Витальевича заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН),

д.ф.-м.н.



С.Н.Андреев

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

1. Н.Е. Случанко, А.Н. Азаревич, А.В. Богач, С.Ю. Гаврилкин, В.В. Глушков, С.В. Демишев, А.В. Духненко, А.Б. Лященко, К.В. Мицен,, В.Б. Филиппов. **Сверхпроводимость в ZrB_{12} при изотопическом замещении $^{10}B-^{11}B$** Письма в ЖЭТФ, т. 94, вып. 8, с. 685 (2011).

2. S.V. Demishev, V.V. Glushkov, I.I. Lobanova, M.A. Anisimov, V.Yu. Ivanov, T.V. Ishchenko, M.S. Karasev, N.A. Samarin, N.E. Sluchanko, V.M. Zimin, and A.V. Semeno **Magnetic phase diagram of MnSi in the high-field region**. Phys. Rev. B v. 85, p. 045131 (2012).

3. Н.Е. Случанко, А.Н. Азаревич, А.В. Богач, В.В. Глушков, С.В. Демишев, А.В. Левченко, В.Б. Филиппов, Н.Ю. Шицевалова **Особенности магнитосопротивления при переходе антиферромагнетик-парамагнетик в $Tm_{1-x}Yb_xB_{12}$** ЖЭТФ т.143, в.5, стр.998-1004 (2013).

4. N.E. Sluchanko, A.N. Azarevich, A.V. Bogach, V.V. Glushkov, S.V. Demishev, S.Yu. Gavrilkin, S. Gabani, K. Flachbart, N.Yu. Shitsevalova, V.B. Filippov, J. Vanacken, V.V. Moshchalkov, J. Stankiewicz, **Magnetoresistance Anisotropy and Magnetic H-T Phase Diagram of $Tm_{0.996}Yb_{0.004}B_{12}$** . Acta Physica Polonica A, v. 126, pp.332-333 (2014).

5. V.V. Glushkov, I.I. Lobanova, V.Yu. Ivanov, V.V. Voronov, V.A. Dyadkin, N.M. Chubova, S.V. Grigoriev, and S.V. Demishev **Scrutinizing Hall Effect in $Mn_{1-x}Fe_xSi$: Fermi Surface Evolution and Hidden Quantum Criticality** Physical Review Letters, v. 115, n.25., p.256601-1-6 (2015).

6. N.E. Sluchanko, A.L. Khoroshilov, M.A. Anisimov, A.N. Azarevich, A.V. Bogach, V.V. Glushkov, S.V. Demishev, N.A. Samarin, N.Yu. Shitsevalova, V.B. Filippov, A.V. Levchenko, G. Pristas, S. Gabani and K. Flachbart **Charge transport in $Ho_xLu_{1-x}B_{12}$: Separating Positive and Negative Magnetoresistance in Metals with Magnetic Ions**. Physical Review B, v.91, n.23, p.235104-1-15 (2015).

7. Н.Е. Случанко, А.В. Богач, М.А. Анисимов, В.В. Глушков, С.В. Демишев, Н.А. Самарин, О.Д. Чистяков, Г.С. Бурханов, С. Габани, К. Флахбарт **Аномалии магнитосопротивления в соединениях с тяжелыми фермионами на основе церия** . Физика низких температур, т. 41, в.12, стр.1296–11312 (2015).

8. V.V. Glushkov, A.D. Bozhko, A.V. Bogach, S.V. Demishev, A.V. Dukhnenko, V.B. Filippov, M.V. Kondrin, A.V. Kuznetsov, I.I. Sannikov, A.V. Semeno, N.Yu. Shitsevalova, V.V. Voronov, N.E. Sluchanko, **Bulk and surface electron transport in topological insulator candidate $YbB_{6-\delta}$** physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters, v.10, n.4, p.320-323 (2016).

9. N.E. Sluchanko, A.N. Azarevich, M. A. Anisimov, A.V. Bogach, S.Yu. Gavrilkin, M.I. Gilmanov, V.V. Glushkov, S.V. Demishev, A.L. Khoroshilov, A.V. Dukhnenko, K.V. Mitsen, N.Yu. Shitsevalova, V. B. Filippov, V. V. Voronov, K.Flachbart **Suppression of superconductivity in $Lu_xZr_{1-x}B_{12}$: Evidence of static magnetic moments induced by nonmagnetic impurities** Physical Review B, v. 93, n.8, p. 085130-1-7 (2016).