

На правах рукописи  
УДК 538.975

Демидов Евгений Владимирович

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ  
КВАНТОВОГО И КЛАССИЧЕСКОГО РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В  
ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ВИСМУТА**

1.3.8. Физика конденсированного состояния  
(физико-математические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2025

Работа выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

**Научный консультант:**

Грабов Владимир Минович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и экспериментальной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена».

**Официальные оппоненты:**

Кульбачинский Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Марков Олег Иванович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой экспериментальной и теоретической физики физико-математического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева»

Полищук Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики Института водного транспорта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова»

**Ведущая организация:**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится «15» мая 2025 г. в «15:00» часов на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 33.2.018.22 созданного на базе Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена по адресу: 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корпус 11, ауд. 64.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 48, корп. 5) и на сайте университета по адресу: [http://disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta\\_000001088.html](http://disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000001088.html)

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 33.2.018.22  
кандидат физико-математических наук

Кононов Алексей  
Андреевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** На протяжении многих десятилетий кристаллы и низкоразмерные объекты висмута и его сплавов вызывают теоретический и практический интерес у исследователей. Этот интерес связан с особенностями кристаллической и энергетической структуры данного класса материалов, которые обуславливают уникальные электронные свойства [1–4]. Электронный энергетический спектр висмута характеризуется малой, по металлическим меркам, концентрацией носителей заряда ( $3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  при температуре 4,2 К,  $25 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  при температуре 300 К) и большой длиной волны де Бройля электронов (порядка 50 нм). Для описания движения электронов в твердом теле, размеры которого сопоставимы с длиной волны де Бройля, необходимо использовать волновое описание движущегося объекта и эффект размерного квантования его энергии.

Размерные масштабы порядка 50 нм экспериментально оказываются легко достижимы различными методами получения тонких пленок. Большая по отношению к «стандартным» металлам дебройлевская длина волны носителей заряда в висмуте позволяет сравнительно легко наблюдать квантоворазмерные эффекты. Именно на висмуте впервые экспериментально был обнаружен квантовый размерный эффект при измерении удельного сопротивления и гальваномагнитных свойств, проявляющийся в осциллирующей зависимости удельного сопротивления, магнетосопротивления и коэффициента Холла от толщины пленки висмута [5]. Эти осцилляции обусловлены квантованием энергии носителей заряда, движение которых ограничено в направлении перпендикулярном плоскости пленки.

Интерес к исследованию висмута в последнее время дополнительно возрос после предсказания свойств топологического изолятора в висмуте [6,7] и материалах на его основе: твердом растворе висмут–сурьма ( $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$ ) [8], теллуриде висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) [9-11], селениде висмута ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) [11-12]. Следует ожидать, что проявление закономерностей состояний, обусловленных топологическими инвариантами как в трехмерных, так и в низкоразмерных структурах, будут наиболее заметны при увеличении вклада поверхности по отношению к объемному вкладу в рассматриваемые эффекты, что в любом случае требует перехода к исследованию низкоразмерных объектов, в первую очередь тонких пленок.

Указанные эффекты теоретически и экспериментально исследованы достаточно хорошо. В большинстве случаев имеется хорошее теоретическое описание наблюдаемых явлений. Однако в случае пленок висмута можно выделить 3 проблемы в рамках квантового размерного эффекта, не получившие точной интерпретации.

Первая проблема заключается в том, что в различных экспериментах наблюдается достаточно большой разброс максимальной толщины пленок, для которой наблюдаются осцилляционные зависимости электрических и гальваномагнитных коэффициентов как проявление квантового размерного эффекта.

Вторая проблема – это наблюдаемое в различных работах существенное различие периода осцилляций указанных коэффициентов, при этом, это не может быть обусловлено анизотропией свойств пленок висмута, т.к. в данных работах все пленки синтезированы таким образом, что плоскости (111) ориентированы параллельно плоскости подложки.

Третья проблема связана с тем, что одним из следствий квантового размерного эффекта является переход полуметалл – полупроводник при размерах образцов порядка длины волны де Бройля носителей заряда [13-15]. За последние несколько десятков лет были предприняты неоднократные попытки экспериментального установления перехода полуметалл-полупроводник в тонких пленках и нитях висмута [16-18]. Однако, несмотря на значительные усилия в этом направлении, экспериментальные результаты и их интерпретация остаются неоднозначными. Так, например, в работе [19] сообщается не об уменьшении, а о росте концентрации носителей заряда с уменьшением толщины пленок висмута. Для интерпретации указанных экспериментальных результатов требуется всестороннее рассмотрение факторов, влияющих на электронные свойства полуметаллов и узкозонных полупроводников в пленочном состоянии.

Изменение электронных свойств узкозонных полупроводников и полуметаллов с уменьшением как минимум одного из пространственных измерений образца, например, в пленочном состоянии, происходит вследствие изменения концентрации и подвижности носителей заряда по отношению к массивному монокристаллу, что обусловлено рядом факторов. На их значения влияет температура, свободная поверхность, кристаллографическая ориентация и концентрация дефектов, внутренние механические напряжения, обусловленные неполной релаксацией (при охлаждении после синтеза) в связи с различием коэффициентов термического расширения пленки и подложки, концентрация и тип легирующей примеси и т.д. Анализ причин изменения электрических и гальваномагнитных свойств полуметаллов и узкозонных полупроводников обычно строится на исследовании изменений подвижности и концентрации носителей заряда.

Для экспериментального определения подвижности и концентрации носителей заряда в массивных полуметаллах и узкозонных полупроводниках можно использовать их связь с коэффициентами переноса, измеряемыми в кинетических экспериментах. Наиболее часто для этого используется комплекс экспериментов по исследованию гальваномагнитных и термоэлектрических свойств. Следует иметь в виду, что кинетические коэффициенты в висмуте вследствие большой анизотропии поверхности Ферми в  $k$ -пространстве являются тензорными величинами. Феноменологическая и электронная теории позволяют получить систему уравнений для коэффициентов переноса в отсутствие магнитного поля и в слабом магнитном поле состоящую из 2 уравнений для электропроводности, 2 уравнений для коэффициента Холла и 8 уравнений для магнетосопротивления, измеренных в различных кристаллографических направлениях [20]. Данные уравнения устанавливают связь между указанными коэффициентами

переноса, подвижностью и концентрацией носителей заряда. В пленках, в отличие от монокристаллов, имеется возможность измерять ряд коэффициентов переноса только в одной плоскости – плоскости пленки. В связи с этим для измерения коэффициентов переноса в различных кристаллографических направлениях требуется получение пленок с различной кристаллографической ориентацией.

Получение экспериментальных образцов тонких пленок с заданной кристаллографической ориентацией относительно плоскости подложки – достаточно сложная задача и в общем случае к настоящему времени она не решена. В большинстве своем пленки висмута получают с преимущественной ориентацией плоскости (111) параллельно плоскости подложки. Вследствие этого в случае тонких пленок висмута чаще всего из 12 коэффициентов тензора электропроводности и гальваноманнитного тензора измеряются только следующие 3 коэффициента:  $\sigma_{11}$ ,  $R_{12,3}$ ,  $\rho_{11,33}$ . В отдельных работах измеряют  $\rho_{11,11}$ . Дополнительно возникают сложности с достижением необходимой точности исследования других свойств, например теплопроводности в плоскости пленки, связанной со сложностью измерения тепловых потоков, обусловленной неконтролируемыми тепловыми потерями через поверхность тонкопленочного образца [21].

Одновременное проявление множества эффектов, большая анизотропия численных значений физических параметров совместно с ограниченными возможностями проведения измерений определяют сложности интерпретации экспериментальных результатов по исследованию явлений переноса в тонких пленках висмута. Поэтому для корректной интерпретации экспериментальных результатов требуется комплексное исследование влияния различных факторов, обуславливающих те или иные закономерности явлений переноса в тонких пленках висмута, детальный контроль их структуры и обоснованное использование более точных по сравнению с общепринятыми приближений при расчете концентрации и подвижности носителей заряда.

Следует отметить, что открываются новые возможности по разделению вкладов поверхности и дефектов кристаллической структуры в тонких пленках висмута после разработки В. А. Комаровым метода зонной перекристаллизации под защитным покрытием для получения монокристаллических пленок [22].

Таким образом, для разрешения трех вышеуказанных проблем интерпретации экспериментальных результатов исследования квантового размерного эффекта в тонких пленках висмута требуется комплексный подход, заключающийся в одновременном учете всей совокупности сопутствующих процессу исследования эффектов, а также постановке специальных экспериментов по разделению вышеописанных вкладов в численные значения параметров физических величин, наблюдаемые при исследовании свойства тонких пленок висмута. Проведенный автором в данной диссертационной работе учет вкладов поверхности и границ кристаллитов в процесс ограничения подвижности носителей заряда, а также учет роли поверхности, границ кристаллитов и внутренних механических

напряжений пленки, в изменение концентрации носителей заряда позволил непротиворечиво интерпретировать наблюдаемые в рамках данной диссертационной работы и описанные в литературе закономерности проявления квантового размерного эффекта в гальваномагнитных свойствах тонких пленок висмута.

Учитывая вышеизложенное, можно сказать, что **актуальность** исследования определяют следующие обстоятельства:

1. Несмотря на установленную природу осцилляционных зависимостей электрических и гальваномагнитных свойств от толщины пленок висмута, имеется ряд экспериментальных результатов в рамках квантового размерного эффекта, не получивших к настоящему моменту научно обоснованной интерпретации.
2. Корректная интерпретация изменения электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических параметров тонких пленок висмута при изменении их толщины требует комплексного исследования их свойств с одновременным контролем кристаллографической ориентации, размеров кристаллитов, толщины пленок и рассмотрение одновременного влияния ряда эффектов и факторов, таких, как классический размерный эффект, влияние механических напряжений, границ кристаллитов и поверхности, а также учета ряда когерентных явлений, в том числе учета квантового размерного эффекта и эффекта слабой локализации носителей заряда.
3. Перспективы исследования и практического применения топологических полуметаллов типа полуметаллов Вейля и Дирака в виде тонкопленочных материалов на основе висмута требуют корректного понимания механизмов формирования электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонких пленок висмута.

**Предмет и объект исследования.** Предметом исследования являются эффекты и механизмы, определяющие гальваномагнитные и термоэлектрические свойства, а также концентрацию и подвижность носителей заряда тонких пленок полуметаллов. Конкретным объектом исследования являются тонкие пленки висмута.

**Целью работы** является установление закономерностей изменения гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонкопленочных образцов полуметаллов в условиях реализации квантового и классического размерных эффектов на примере тонких пленок висмута.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи.**

1. Изучить по литературным источникам особенности свойств висмута, теорию формирования и роста тонких пленок, теорию квантового размерного эффекта, известные теоретические и экспериментальные результаты исследования свойств тонких пленок полуметаллов в условиях

реализации квантового и классического размерных эффектов, а также причины влияния на результаты исследований таких факторов, как степень дефектности (то есть качество) кристаллической структуры, внутренние механические напряжения, концентрация и тип легирующей примеси и т.д.) на свойства тонких пленок полуметаллов.

2. Разработать новые методы или определить оптимальные режимы существующих методов получения тонких пленок висмута с заданной кристаллографической ориентацией и совершенством структуры, разработать способы контроля структуры и толщины пленок висмута методами атомно-силовой микроскопии.

3. Вырастить серии пленок висмута чистотой 99,999% и пленки легированного висмута, а также пленки твердого раствора висмут-сурьма в широком диапазоне толщин с различным качеством кристаллической структуры.

4. Исследовать кристаллическую структуру и морфологию поверхности полученных пленок, а также их электрические, гальваномагнитные и термоэлектрические свойства в широком интервале температур и магнитных полей.

5. На основе фундаментальных знаний и проведенных исследований решить задачу корректной интерпретации наблюдаемых закономерностей в электронных явлениях переноса в условиях проявления квантового и классического размерных эффектов в тонких пленках висмута.

6. Сформировать практические рекомендации применения на основе полученных новых знаний и создания прикладных устройств на их основе.

#### **Научная новизна.**

В ходе выполненного автором комплексного диссертационного исследования квантового размерного эффекта в пленках висмута показано, что учет вкладов поверхности, а также границ кристаллитов и хиллоков в ограничение подвижности носителей заряда, и, кроме того, учет вкладов поверхности, границ кристаллитов, хиллоков и механических деформаций в изменение концентрации носителей заряда, позволяет непротиворечиво интерпретировать не только наблюдаемые в рамках данной диссертационной работы, но и описанные в литературе закономерности проявления квантового размерного эффекта в электрических и гальваномагнитных свойствах тонких пленок висмута.

Для достижения этой цели была произведена разработка и осуществлено развитие целого ряда методов синтеза тонких пленок, методов исследования их структуры и определения толщины, а также выполнена экспериментальная проверка возможности используемых для расчёта подвижности и концентрации носителей заряда приближений, в ходе чего были получены следующие новые результаты:

1. Впервые определены и практически реализованы условия выращивания крупноблочных пленок висмута толщиной до 10 нм методом термического испарения в вакууме, имеющих в своей структуре блоки лишь 2-х кристаллографических ориентаций с согласованной ориентацией

кристаллографических осей в соседних кристаллитах (оси  $C_1$  и  $C_2$  в плоскости (111) повернуты на  $60^\circ$  в соседних кристаллитах).

2. Разработан высокоточный способ измерения размеров кристаллитов и толщины блочных пленок висмута методом атомно-силовой микроскопии с применением избирательного химического травления (патент № 2452934 В.М. Грабов, Е.В. Демидов, В.А. Комаров. Способ препарирования тонких пленок висмута на слюде для выявления границ блоков методом атомно-силовой микроскопии. Дата приоритета: 30.06.2010. Дата выдачи: 10.06.2012).

3. Определен вклад поверхности и границ кристаллитов в рассеяние носителей заряда в пленках висмута.

4. Уточнена минимальная концентрация теллура в легированном висмуте, при которой в интервале температур от 77 К до 300 К в явлениях переноса экспериментально проявляется только электронная проводимость (дырочная проводимость, характерная для нелегированного висмута, не проявляется). Предложена методика определения концентрации и подвижности носителей заряда в пленках висмута, легированного теллуrom, в случае температурного возбуждения электронно-дырочных пар, путем создания эталонных тонкопленочных образцов с сильным ограничением подвижности носителей заряда, осуществляемым с помощью малой толщины пленок, по сравнению с длиной свободного пробега носителей заряда.

5. Разработана методика расчёта подвижности и концентрации носителей заряда в тонких пленках висмута и твердого раствора висмут-сурьма с ориентацией плоскости (111), параллельной плоскости подложки с использованием экспериментальных значений удельного сопротивления, магнетосопротивления, коэффициента Холла и термоэдс. Проведенные расчёты позволили непротиворечиво интерпретировать совокупность наблюдаемых гальваномагнитных и термоэлектрических явлений в тонких пленках висмута в широком диапазоне толщин (от 10 нм до нескольких микрометров) в условиях реализации квантового и классического размерных эффектов.

6. Установлены причины отклонения экспериментального проявления квантового размерного эффекта в тонких пленках висмута от его теоретического описания, и показано, что причина отклонения заключена в неучете ряда сопутствующих эффектов, таких как изменение концентрации носителей заряда в тонких пленках и ограничение длины свободного пробега электронов границами кристаллитов и хиллоков.

7. Установлена причина роста концентрации носителей заряда в тонких пленках висмута при уменьшении их толщины. Обнаружены различия в скорости роста концентраций электронов и дырок при уменьшении толщины пленок висмута для толщин, меньших 25 нм.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

Комплексное исследование электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонких пленок висмута, синтезированных при непосредственном участии автора диссертации, выполненное в широком диапазоне толщин пленок при одновременном детальном контроле структуры

и толщины каждого исследуемого тонкопленочного образца позволили разрешить целый ряд имеющихся в литературе противоречий экспериментального наблюдения квантового размерного эффекта. Этому способствовало также детальное рассмотрение явлений, обусловленных классическим размерным эффектом, и определяемых влиянием на концентрацию носителей заряда механических напряжений, поверхности и границ кристаллитов.

Совокупность результатов настоящей работы способствует развитию фундаментальных представлений о физических явлениях в тонких пленках полуметаллов, а полученные экспериментальные данные и их анализ расширяют теоретические представления о влиянии классического и квантового размерных эффектов на особенности явлений переноса в полуметаллах.

Разработанные в данной работе новые способы определения размеров блоков тонкопленочных образцов, а также методы контроля их состава и толщины позволяют использовать полученную в работе детальную информацию о фактическом строении исследуемых объектов для более корректной интерпретации экспериментальных результатов по явлениям переноса и могут быть применены для контроля качества тонкопленочных изделий, полученных авторами других научных работ. Кроме того, полученные в данной диссертационной работе результаты могут быть использованы при изготовлении низкоразмерных структур на основе висмута с заданной концентрацией носителей заряда.

Предложенный автором подход к выполнению контроля ограничения подвижности электронов и дырок поверхностью и границами кристаллитов, приводящего к модификации значения термоэдс пленок висмута и твердого раствора висмут-сурьма, может быть использован для увеличения термоэлектрической эффективности тонких пленок указанных материалов и для создания р-ветви термоэлектрических преобразователей энергии в области низких температур.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Атомно-силовая микроскопия в сочетании с избирательным химическим травлением и декорированием является высокоточным и эффективным методом определения толщины, размеров кристаллитов и, кроме того, их взаимной кристаллографической ориентации тонких пленок висмута, имеющих блочную структуру.

2. Для наблюдения квантового размерного эффекта в крупноблочных пленках висмута (111), с размерами блоков более чем на порядок, превышающих их толщину, при синтезе пленок методом термического испарения в вакууме оптимальными являются следующие условия: использование подложки из слюды (мусковит), поддержание температуры подложки в процессе получения пленки около 140°C, последующий отжиг пленки при температуре около 240 °C в течении не менее 30 минут.

3. Применение приближения изотропности длины свободного пробега электронов в плоскости подложки позволяет корректно произвести расчёт концентрации и подвижности носителей заряда в плёнках висмута (111) с использованием гальваномагнитных и термоэлектрических свойств, в случае преимущественного рассеяния электронов поверхностью по сравнению с рассеянием на фононах.

4. Рост концентрации носителей заряда в пленках висмута при уменьшении их толщины обусловлен увеличением вклада дополнительной концентрации, связанной с наличием свободной поверхности, границами кристаллитов и хиллоков.

5. В области проявления квантового размерного эффекта в пленках висмута на экспериментально определяемую концентрацию носителей заряда оказывают влияние два конкурирующих процесса: увеличение концентрации из-за дополнительной концентрации, связанной с наличием свободной поверхности, границами кристаллитов и хиллоков и уменьшение концентрации, обусловленное переходом полуметалл – полупроводник, который приводит к уменьшению скорости роста концентрации носителей заряда при уменьшении толщины пленок, по сравнению с областью отсутствия квантового размерного эффекта не реализуется.

6. При наблюдении квантового размерного эффекта в пленках висмута причиной существенного расхождения периода осцилляций у разных авторов является различие степени изменения концентрации и энергии Ферми электронов в тонких пленках по отношению к массивному висмуту, определяемое возникающими механическими напряжениями, вариациями структуры поверхности, степени дефектности и различной кристаллографической ориентацией пленки.

7. Разнообразие интервалов толщин пленок висмута (111), при которых наблюдается квантовый размерный эффект у разных авторов, обусловлено различием максимальной толщины пленок, выше которой нарушается условие превышения значения длины свободного пробега электронов (в направлении, перпендикулярном плоскости пленки) по сравнению с толщиной пленки. Значение критической толщины пленок определяется в первую очередь концентрацией границ кристаллитов и хиллоков и зависит от условий получения тонких пленок.

**Достоверность и обоснованность** результатов, полученных в данной работе, обеспечивается: анализом известных научных работ, применением апробированных способов получения тонких пленок при контроле их структуры и состава комплексом различных современных методов, сравнительным анализом их результатов, экспериментальным исследованием апробированными методами комплекса гальваномагнитных явлений в этих пленках, их интерпретацией в рамках общепризнанных теорий, согласованностью полученных результатов с результатами опубликованных работ в той части, в которой сравнение результатов оказывается возможным.

### **Связь темы с планом научных работ.**

Диссертационная работа проводилась в рамках тематики отдела физики конденсированного состояния НИИ Физики и кафедры общей и экспериментальной физики РГПУ им. А.И. Герцена (Финансирование:

– Министерство образования и науки РФ в рамках реализации аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы», проект № 2.1.1/9206, 2009-2011 гг., федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», гос. контракт от 22 марта 2010 г. № 02.740.11.0544 2010-2012 гг., Соглашение от 07 сентября 2012 г. № 14В37.21.0891(2012-2013 гг., базовая части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2014/376 (проект № 59), 2014-2016 гг.,

– Российский фонд фундаментальных исследований, проект № 16-32-00313, 2016-2018 гг.

– Министерство науки и высшего образования РФ, проект № 3.4856.2017/БЧ (FSZN-2017-0001), 2017-2019 гг.

– Министерство просвещения Российской Федерации в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований, проекты FSZN-2020-0026, 2020-2022 гг. и VRFY-2023-0005 2023-2024 гг.

### **Личный вклад автора.**

Лично автором были сформулированы цели и задачи исследования, определены оптимальные режимы получения тонких пленок висмута с заданной кристаллографической ориентацией и совершенством структуры, разработаны новые способы контроля структуры и толщины пленок висмута методами атомно-силовой микроскопии, получена большая часть экспериментальных образцов. Автором самостоятельно разработана методика расчёта подвижности и концентрации носителей заряда в тонких пленках висмута и твердого раствора висмут-сурьма с ориентацией плоскости (111) параллельно плоскости подложки на основе удельного сопротивления, магнетосопротивления, коэффициента Холла и термоэдс, позволившая ему непротиворечиво интерпретировать совокупность наблюдаемых гальваномагнитных и термоэлектрических явлений в тонких пленках висмута в рамках квантового и классического размерных эффектов. Автор принимал основное участие в изготовлении тонких пленок и контроля их структуры. Измерение гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонких пленок чистого и легированного висмута, а также твердого раствора висмут-сурьма проводилось совместно с соавторами опубликованных работ.

**Апробация работы.** Основные научные результаты докладывались на следующих конференциях:

– X, XI, XII, XIII, XIV, XVI, XVII XVIII Международная конференция по термоэлектричеству (2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2018, 2021, 2023 гг.);

- XV, XIV и XVIII Международный форум по термоэлектричеству (2009, 2011, 2020 г.);
- XI, XII XIII Международная конференция «Пленки и покрытия» (Санкт-Петербург, 2011, 2015, 2017 гг.);
- XVI, XVII, XVIII Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка, 2009, 2011, 2013 гг.);
- XXIII Российская конференция по электронной микроскопии (Черноголовка, 2010 г.);
- V Международная конференция по вопросам материаловедения и физики конденсированного состояния (Кишинев, Молдова, 2010)
- XI, XIV, XV международная конференция «Физика диэлектриков» (Санкт-Петербург, 2008, 2017, 2020 гг.);
- Конференция с международным участием «Электронно-лучевые технологии» (Зеленоград, 2019 г).

### **Публикации**

По основным результатам исследований, вошедших в диссертацию, автором опубликовано 68 работ, из них 29 публикаций в изданиях, входящих в базы SCOPUS и (или) WOS CC, 1 монография.

По теме диссертации опубликовано в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 33 работы и 4 патента РФ.

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемой литературы. Материал изложен на 270 страницах, содержит 120 рисунков, 6 таблиц. Список литературы включает 308 наименований.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** сформулированы актуальность, цели и задачи работы, обоснованы методы исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены выносимые на защиту положения. Приведены список конференций и семинаров, на которых апробировано содержание работы, и список публикаций автора, в которых изложено основное научное содержание диссертации.

**Глава 1 «Физические свойства кристаллов типа висмута и обзор актуальных проблем по когерентным явлениям в полуметаллах и явлениям переноса в тонких пленках висмута».**

Глава содержит обзор литературы, посвященный описанию кристаллической структуры и ее симметрии, особенностях химической связи, структуре зоны Бриллюэна, энергетическом спектре носителей заряда кристаллов висмута, теории классического и квантового размерного эффекта, эффекта слабой локализации электронов. Отражено современное состояние исследований явлений переноса в тонких пленках полуметаллов, полученных ранее другими авторами.

На основании анализа данных научной литературы сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

**Глава 2 «Методы получения тонких пленок системы висмут-сурьма и исследования их структуры и состава»** содержит краткую теорию процессов роста тонкой пленки и описание различных методов получения тонких пленок: метод термического испарения в вакууме, молекулярная лучевая эпитаксия, импульсное лазерное осаждение, магнетронное распыление, электроосаждение и др. Отражены преимущества и недостатки данных методов.

Проведено исследование различных возможностей улучшения структуры пленок: отжиг, зонная рекристаллизация под защитным покрытием. Для метода зонной рекристаллизации под защитным покрытием установлено ограничение на получение пленок висмута минимальной толщины. Метод позволяет получать пленки висмута толщиной более 200 нм.

Показано, что для получения крупноблочных пленок висмута (111), с размерами блоков более чем на порядок превышающими их толщину, оптимальным является использование подложки из слюды (мусковит) и метод термического испарения в вакууме с температурой подложки 140 °С и отжигом при температуре 240-260 °С в течении не менее 30 минут.

Методом дискретного термического испарения в вакууме с последующей зонной перекристаллизации под защитным покрытием впервые получены многокомпонентные монокристаллические легированные теллуром пленки висмута и пленки твердого раствора висмут-сурьма, толщиной 0,3 - 1 мкм с равномерным распределением компонентов по объему. Ранее данная методика использовалась только для получения монокристаллических пленок чистого висмута.

В данной главе приведено описание используемых методов контроля структуры тонких пленок (атомно-силовая и электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ) и разработанных новых способов измерения размеров кристаллитов, их взаимной кристаллографической ориентации в блочных пленках висмута методом атомно-силовой микроскопии с применением избирательного химического травления или декорирования. Также для пленок толщиной меньше 100 нм представлен высокоточный метод определения их толщины с помощью избирательного химического травления и атомно-силовой микроскопии, разработанный в рамках исследования.

Приведено описание используемых в работе методов контроля состава тонкопленочных образцов: времяпролетная масс-спектрометрия, рентгеноструктурный анализ (по изменению межплоскостных расстояний в зависимости от содержания сурьмы в твердом растворе висмут-сурьма), рентгенофлуоресцентный анализ. Для рентгенофлуоресцентного анализа тонких пленок критически важным является наличие тонкопленочных эталонов состава. В рамках исследования совместно с В.А. Комаровым разработан относительно простой способ изготовления эталонов для рентгенофлуоресцентного анализа состава тонких пленок малокомпонентных твердых растворов и сплавов. Суть метода заключается в послойном нанесении на подложку слоев компонентов сплава или твердого раствора толщиной, обеспечивающей соотношение количества атомов компонентов,

соответствующее их соотношению в эталонируемом сплаве или твердом растворе. Таким образом, технологически сложный процесс нанесения тонкой пленки многокомпонентного состава с заданной концентрацией компонентов заменяется на относительно простое последовательное нанесение однокомпонентных слоев заданной толщины, обеспечивающей такое же соотношение компонентов, как в эталонируемом сплаве или твердом растворе.

Представленные в главе результаты использовались для проведения исследований, описанных в последующих главах.

**Глава 3 «Явления переноса в пленках висмута и сплавах висмут-сурьма»** посвящена представлению результатов исследования гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонких пленок чистого висмута и висмута, легированного теллуром. Отдельные, наиболее важные для темы диссертационного исследования результаты, приведены по электрическим свойствам пленок твердого раствора висмут-сурьма.

Гальваномагнитные и термоэлектрические свойства в тонких пленках в значительной степени определяются структурой пленки — кристаллографической ориентацией осей блоков относительно подложки и степенью совершенства структуры (размерами блоков, их взаимной ориентацией, количеством точечных дефектов).

Для определения вклада границ кристаллитов в рассеяние носителей заряда в пленках висмута были исследованы гальваномагнитные и термоэлектрические свойства в пленках висмута толщиной 300 нм, имеющих различные размеры кристаллитов и монокристаллической пленки такой же толщины [23]. Размеры кристаллитов варьировались путем изменения температуры подложки в процессе получения пленок.

Критерием совершенства пленки может служить магнетосопротивление (рис. 1).

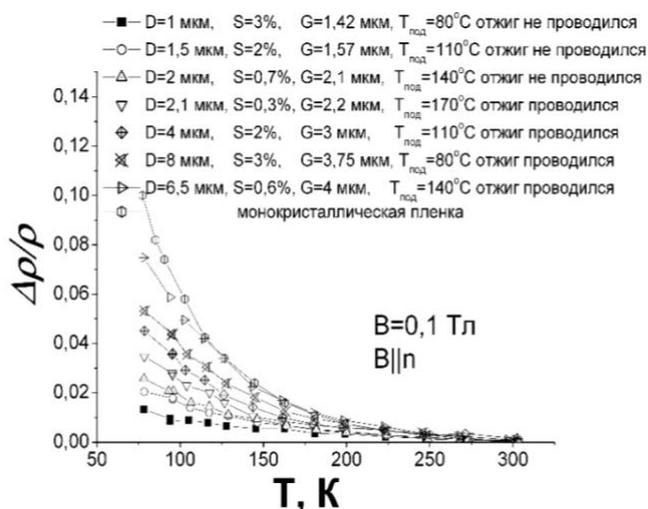


Рис. 1. Зависимости  $\Delta\rho/\rho$  от  $T$  для различных пленок в слабом магнитном поле

При низких температурах наибольшее магнетосопротивление имеет пленка с малой концентрацией хиллоков и достаточно большими размерами кристаллитов. Однако эта зависимость магнетосопротивления от размеров кристаллитов ( $D$ ) не является монотонной, в частности, для пленки с размерами кристаллитов  $D = 8$  мкм магнетосопротивление меньше, чем у пленки с  $D = 6,5$  мкм (рис. 1).

Этот факт указывает на вклад в рассеяние носителей заряда не только границ кристаллитов, но и хиллоков. В связи с этим в качестве критерия

совершенства структуры, использовалась величина  $G$ , учитывающая размер и кристаллитов, и концентрацию хиллоков в пленке висмута.

Величина  $G$  рассчитывалась из предположения независимости разных вкладов в рассеяние носителей заряда. Тогда в соответствии с правилом Матиссена:

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{D} + \frac{1}{l}, \quad (1)$$

где  $D$  — средний размер кристаллита,  $l$  — среднее расстояние между границами хиллоков. Зависимость  $G$  от температуры подложки приведена на рис. 2.

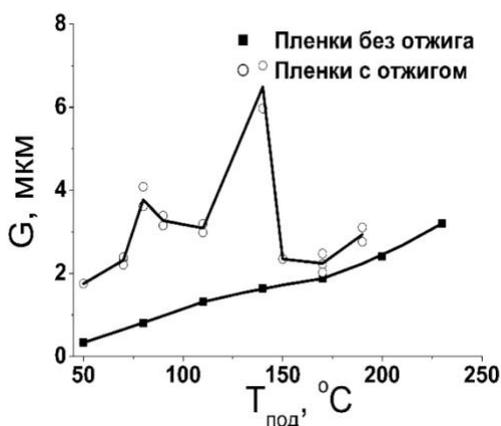


Рис. 2. Зависимости  $G$  от температуры подложки для отожженных и не отожженных пленок. Толщина пленок 300 нм

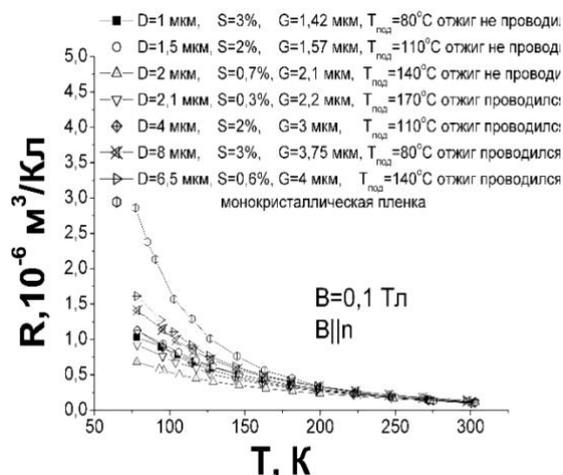


Рис. 3. Зависимости  $R$  от  $T$  для различных пленок в слабом магнитном поле.

На графике рис. 3 представлена температурная зависимость коэффициента Холла для пленок, имеющих различный структурный параметр  $G$ . Эффект Холла является разностным эффектом и в случае одинаковой концентрации электронов и дырок зависит от разности их подвижностей. Для всех пленок в исследуемом температурном интервале знак коэффициента Холла положителен. Это свидетельствует о более высоких подвижностях дырок в сравнении с подвижностями электронов.

В случае отожженных пленок с увеличением  $G$  значение коэффициента Холла при низких температурах увеличивается, что указывает на увеличение разности подвижностей электронов и дырок в сторону подвижности дырок. Не отожженные пленки, полученные при низкой температуре подложки (80 и 110 °C), имеют несколько большее значение коэффициента Холла чем не отожженная пленка, полученная при температуре подложки 140 °C и отожженные пленки, полученные при температурах подложки 170 и 110 °C.

Вполне вероятно, что пленки, полученные при низкой температуре подложки и не подвергавшиеся отжигу, имеют более высокую концентрацию дефектов (например, точечных дефектов), не учитываемых в данной работе, концентрация которых не входит в структурный параметр  $G$ . Эти дефекты смещают разницу подвижностей электронов и дырок в сторону дырок, в отличие от границ кристаллитов, что приводит даже в случае низких значений структурного параметра  $G$  и, в целом, более низкого совершенства структуры

по данным магнетосопротивления к более высоким значениям коэффициента Холла.

На рис. 4 приведено сравнение дифференциальных термоэдс монокристаллических и блочных пленок различных толщин [24]. Стоит

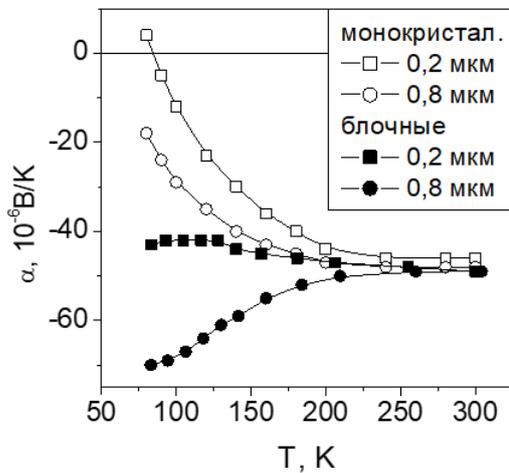


Рис. 4. Зависимость термоэдс от температуры монокристаллических и блочных пленок  $Bi$  на слюде.

отметить, что измерение термоэдс в тонких пленках связано с технической сложностью надежного контроля градиента температуры вдоль пленки. В настоящей работе данная проблема решалась измерением градиента температуры непосредственно на подложке пленки при измерении термоэдс [25].

Для монокристаллических пленок наблюдается уменьшение термоэдс по абсолютной величине при понижении температуры со сменой знака для пленки толщиной 0.2 мкм при температуре около 90 К. Для блочных пленок той же толщины величина термоэдс при низкой температуре имеет значительно большие значения по абсолютной величине. Для пленки 0.8 мкм термоэдс значительно превышает значение соответствующей компоненты в монокристалле висмута. Из представленных результатов видно, что границы блоков влияют на термоэдс аналогично влиянию на коэффициент Холла, ограничивая подвижность дырок больше, чем подвижность электронов.

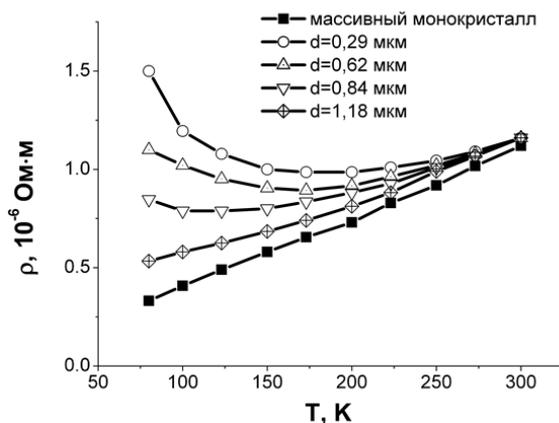


Рис. 5. Зависимость удельного сопротивления от температуры для монокристаллических пленок висмута различной толщины и массивного монокристалла висмута

различной толщины. При уменьшении толщины пленки почти линейная зависимость удельного сопротивления, характерная для массивного кристалла постепенно переходит к полупроводниковому виду, что определяется сильным ограничением подвижности носителей заряда толщиной пленки. В

Для выяснения влияния толщины пленки висмута на гальваномагнитные и термоэлектрические свойства лучше использовать монокристаллические пленки висмута, полученные методом зонной перекристаллизации под покрытием, т. к. для тонких пленок, полученных методом термического испарения, степень совершенства структуры, в большинстве случаев, является функцией толщины пленки.

На рисунке 5 представлена зависимости  $\rho(T)$  для монокристаллических пленок

различной толщины. При уменьшении толщины пленки почти линейная зависимость удельного сопротивления, характерная для массивного кристалла постепенно переходит к полупроводниковому виду, что определяется сильным ограничением подвижности носителей заряда толщиной пленки. В

Для выяснения влияния толщины пленки висмута на гальваномагнитные и термоэлектрические свойства лучше использовать монокристаллические пленки висмута, полученные методом зонной перекристаллизации под покрытием, т. к. для тонких пленок, полученных методом термического испарения, степень совершенства структуры, в большинстве случаев, является функцией толщины пленки.

На рисунке 5 представлена зависимости  $\rho(T)$  для монокристаллических пленок

различной толщины. При уменьшении толщины пленки почти линейная зависимость удельного сопротивления, характерная для массивного кристалла постепенно переходит к полупроводниковому виду, что определяется сильным ограничением подвижности носителей заряда толщиной пленки. В

связи с этим зависимость  $\rho(T)$  в тонких пленках в большей степени определяется температурной зависимостью концентрации носителей заряда по сравнению с массивным монокристаллом висмута. Значение магнетосопротивления при низких температурах в пленках висмута сильно уменьшается с уменьшением толщины, что также определяется усилением роли поверхности в ограничении подвижности носителей заряда.

На рисунках 6 и 7 приведены температурные зависимости коэффициента Холла и термоэдс в монокристаллических пленках висмута.

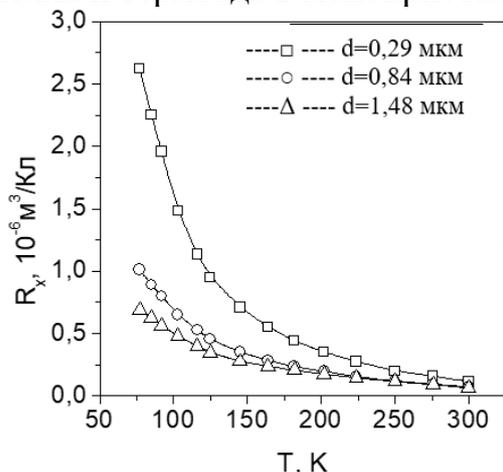


Рис. 6. Зависимость коэффициента Холла от температуры для монокристаллических пленок висмута различной толщины,  $B=0,1$  Тл.

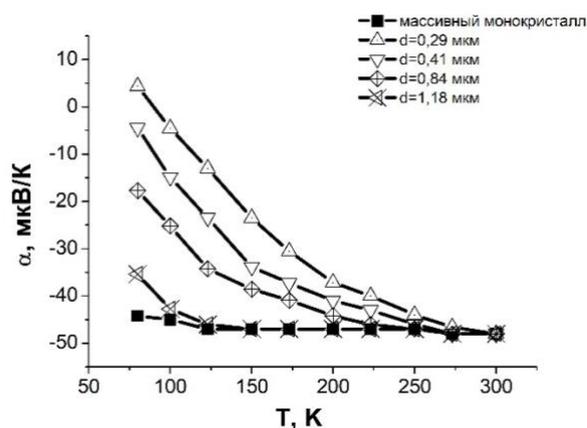


Рис. 7. Зависимость коэффициента термоэдс от температуры для монокристаллических пленок висмута различной толщины.

Качественный анализ данных зависимостей указывает на более сильное ограничение поверхностью подвижности электронов по сравнению с подвижностью дырок.

Несколько иная картина наблюдается для более тонких пленок висмута. К сожалению, монокристаллические пленки методом зонной перекристаллизацией под покрытием удается получить с минимальной толщиной 200 нм. Поэтому исследование более тонких пленок висмута проводилось исключительно на блочных образцах.

Пленки висмута толщинами 40–100 нм характеризуются монотонным возрастанием удельного сопротивления при понижении температуры и стремлением зависимости удельного сопротивления от температуры к насыщению в области температур ниже 15 К.

Уменьшение толщины пленки менее 40 нм сопровождается появлением области с металлическим температурным ходом удельного сопротивления при низких температурах. Образовавшийся максимум на температурной зависимости сдвигается в область более высоких температур с уменьшением толщины пленки (рис. 8). В области низких температур удельное сопротивление для самых тонких пленок уменьшается с уменьшением их толщины. Для температуры 77К данный переход наблюдается при толщинах около 30 нм. Для пленок висмут-сурьма в полупроводниковой области данный переход наблюдается для более высоких толщин, например для состава  $\text{Bi}_{92}\text{Sb}_8$  (рис.9) данный переход наблюдается в

районе 300нм. По-видимому, это обусловлено более низкой концентраций носителей заряда.

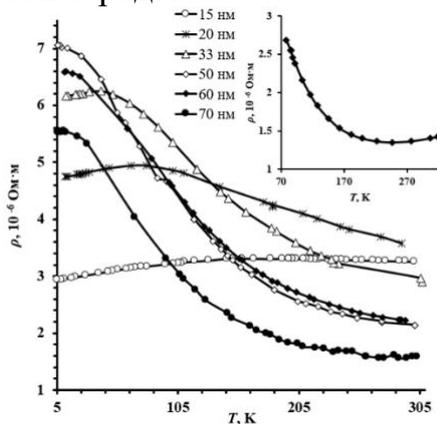


Рис. 8. Температурные зависимости удельного сопротивления пленок висмута различной толщины. На вставке — температурная зависимость удельного сопротивления пленки висмута толщиной 150 нм

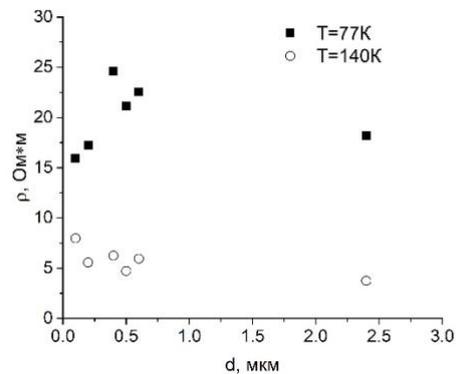


Рис. 9. Зависимость удельного сопротивления от толщины пленок  $Bi_{92}Sb_8$  для температур 77К и 140К

На рис. 10 представлены зависимости удельного сопротивления ( $\rho$ ) и коэффициента Холла ( $R$ ) от толщины пленки ( $d$ ) при температуре 77К. Для пленок толщиной меньше 50 нм зависимость

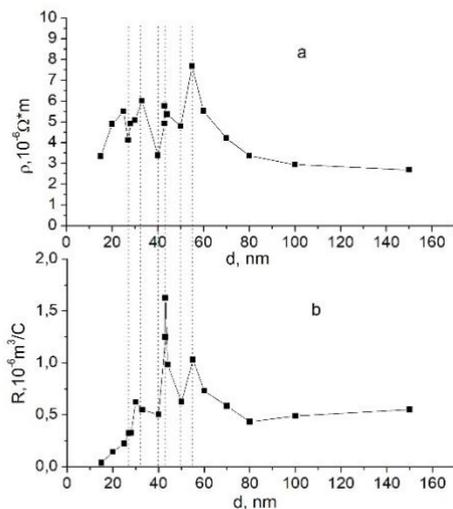


Рис. 10. Зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) пленок висмута на слюде от толщины пленки.

указанных гальваномагнитных коэффициентов от толщины пленки носит осциллирующий характер. Для больших толщин осцилляции резко пропадают. Удельное сопротивление и коэффициент Холла монотонно уменьшаются с увеличением толщины пленки. Особо отметим, что осцилляционные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла находятся в фазе.

Это указывает на то, что данные осцилляции обусловлены размерным квантованием энергетического спектра электронов. В случае дырок эти зависимости находились бы в противофазе. Этот вывод легко сделать, учтя то обстоятельство, что при реализации квантового размерного

эффекта причина для осцилляционных зависимостей гальваномагнитных коэффициентов общая: скачки плотности состояний. При этом в проводимость электроны и дырки вносят суммарный вклад, а в коэффициент Холла разностный. Результаты исследования относительного магнетосопротивления ( $\Delta\rho/\rho$ ) для пленок толщиной 15–100 нм представлены на рис. 11. Следует выделить изменение характера температурной зависимости  $\Delta\rho/\rho$ :

с монотонного увеличения  $\Delta\rho/\rho$  с понижением температуры для пленок толщинами более 50 нм на зависимость с максимумом для пленок с толщинами менее 50 нм, не характерную для монокристаллов висмута [26].

Указанный максимум смещается в область более высокой температуры с уменьшением толщины пленки. Это означает, что с понижением температуры, начиная с некоторого значения последней, подвижность носителей электрического заряда уменьшается, а не остается постоянной, как в монокристалле и более толстых пленках.

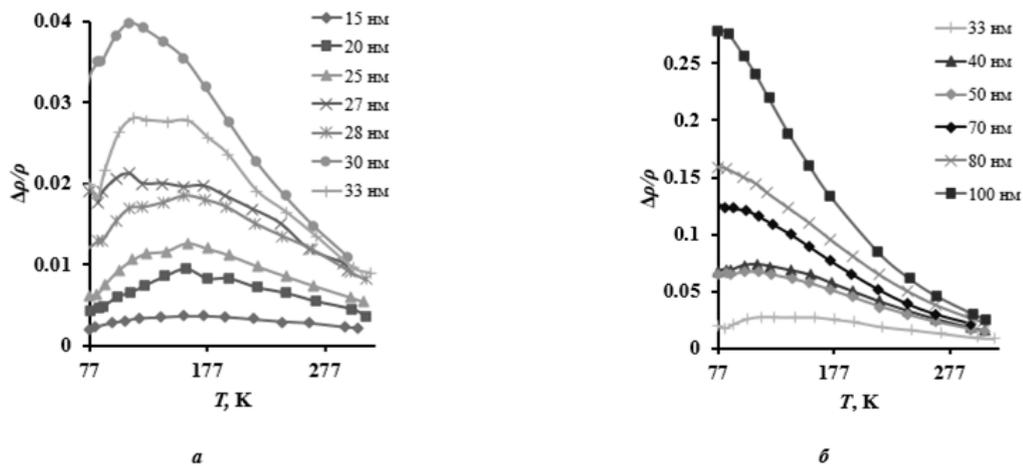


Рис. 11. Температурная зависимость относительного магнетосопротивления пленок толщинами: а — 15–33 нм; б — 33–100 нм;  $B=0,65$  Тл.

Эта аномалия может быть проявлением эффекта слабой локализации, экспериментально обнаруженного в висмуте Комником в работах [27-29]. Данный эффект представляет собой проявление квантово-механической интерференции электронов самих с собой в слабо разупорядоченных материалах с металлическим типом проводимости. Слабая локализация приводит к снижению подвижности частиц, а следовательно, к повышению сопротивления. В магнитном поле эффект слабой локализации разрушается, поэтому одной из характерных черт слабой локализации является отрицательное магнетосопротивление, т.е. уменьшение удельного сопротивления в магнитном поле.

При анализе эффекта слабой локализации в тонких пленках висмута в перпендикулярном магнитном поле [30] было показано, что отрицательное магнетосопротивление в пленках висмута в перпендикулярном магнитном поле не наблюдается, а может наблюдаться только в параллельном магнитном поле. В тонких пленках висмута на слюде нами обнаружено отрицательное магнетосопротивления в параллельном магнитном поле, при этом для пленок толщиной меньше 100 нм положение максимума магнетосопротивления зависит от толщины пленки (рис. 12).

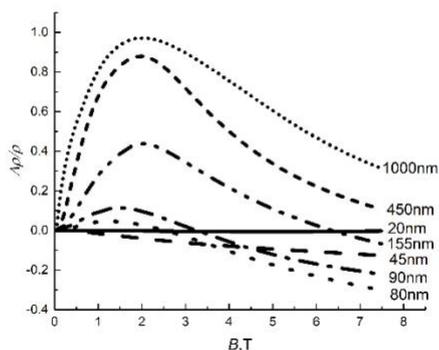


Рис. 12. Магнетополевая зависимость магнетосопротивления пленок висмута при  $T=10\text{K}$ . Вектор индукции магнитного поля лежит в плоскости подложки и его ориентация параллельна току.

Существует несколько возможных причин возникновения немонотонных полевых зависимостей магнетосопротивления в случае ориентации магнитного поля параллельно току. Во-первых, максимум продольного магнетосопротивления в тонких пленках может возникать при реализации гальваномагнитного размерного эффекта. Однако в этом случае его положение на магнетополевой зависимости должно смещаться в область больших магнитных полей при уменьшении толщины. В нашем эксперименте для пленок толщиной меньше 100 нм

наблюдается обратная ситуация.

Второй причиной, немонотонной зависимости магнетосопротивления при реализации продольного эффекта может возникнуть в результате увеличения концентрации носителей заряда в полуметалле в ультраквантовой области магнитных полей [31,32]. Достижение квантового предела определяется исключительно ориентацией магнитного поля относительно кристаллографических осей и концентрацией носителей заряда и не зависит от длины свободного пробега носителей заряда. При увеличении концентрации носителей заряда положение максимума будет смещаться в область более высоких полей. Как будет показано в четвертой главе, в пленках висмута при уменьшении их толщины меньше 50 нм наблюдается рост концентрации носителей заряда.

На основании изложенного можно сделать вывод, что вид продольного магнетосопротивления на магнетополевой зависимости в исследованных пленках висмута определяется достижением ультраквантовой области магнитных полей для пленок больше 100 нм, а для пленок меньших толщин возможным механизмом его формирования является эффект слабой локализации. Стоит отметить, что объем исследований, выполненных в данной работе, не является достаточным, чтобы достоверно утверждать, что наблюдаемая аномалия на температурной зависимости магнетосопротивления (рис. 11) и отрицательное продольное магнетосопротивление в пленках меньше 100 нм (рис. 12) является следствием проявления слабой локализации.

Для точного установления механизма требуются дополнительные эксперименты, в том числе исследования влияния концентрации носителей заряда на наблюдаемые эффекты путем создания пленок висмута, легированных донорными и акцепторными примесями или формированием пленок на подложках с температурным коэффициентом расширения большим или меньшим чем в висмуте.

Наличие в висмуте нескольких типов носителей заряда, большая анизотропия свойств с одновременным ограниченными возможностями проведения измерений в тонких пленках определяют сложности корректной интерпретации экспериментальных результатов по исследованию явлений переноса в тонких пленках висмута. Одним из способов преодоления указанных трудностей является исследование легированных тонких пленок. Процесс легирования позволяет управлять концентрацией электронов или дырок, что позволяет упростить интерпретацию экспериментальных результатов, обеспечивая дополнительные возможности исследования параметров носителей заряда пленок полуметаллов. Для использования данных возможностей в работе исследовались пленки висмута, легированные теллуром. Были исследованы пленки с концентрацией теллура от 0.005 ат% до 0.15 ат%

На рис. 13 представлены температурные зависимости удельного сопротивления, коэффициента Холла и магнетосопротивления исследуемых пленок, а также удельного сопротивления массивных монокристаллов висмута, легированного теллуром в той же концентрации.

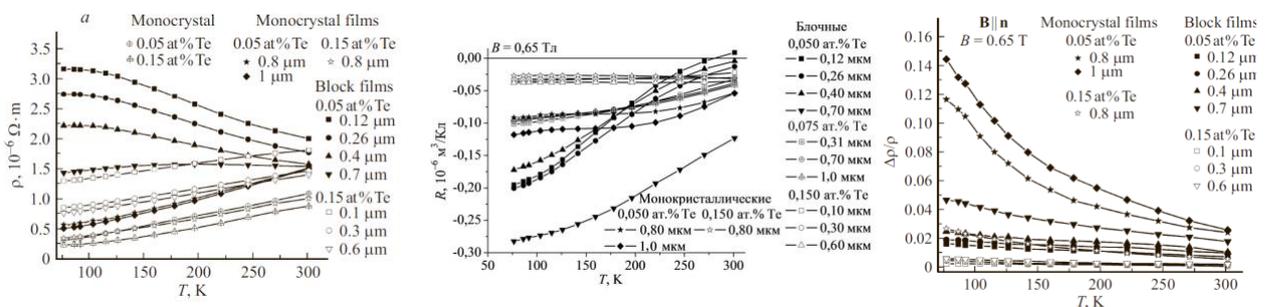


Рис. 13. Температурные зависимости удельного сопротивления (а), коэффициента Холла (б) и относительного магнетосопротивления (в) блочных и монокристаллических пленок висмута, легированного теллуром в количестве 0,05 и 0,15 ат%, различной толщины.

Характер температурной зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла блочных и монокристаллических пленок Вi с содержанием теллура 0.15 ат% такой же, как для монокристаллов того же состава. Характерная для металлов, близкая к линейной, температурная зависимость удельного сопротивления, близкие значения коэффициента Холла в монокристаллах, монокристаллических и блочных пленках и независимость его от температуры указывают на то, что носителями заряда являются только электроны зоны проводимости, концентрация которых одинакова в пленках и монокристаллах и не зависит от температуры в исследованном интервале [33,34].

В блочных пленках висмута с концентрацией теллура 0.05 ат%, в отличие от соответствующих монокристаллов и монокристаллических пленок, происходит плавное возрастание удельного сопротивления и абсолютной величины коэффициента Холла при понижении температуры. В области  $T = 77-110\text{K}$  на температурной зависимости удельного сопротивления блочных пленок толщиной меньше 0,4 мкм наблюдается «плато», откуда следует, что носителями заряда в этой области температур являются только электроны

зоны проводимости, концентрация которых не зависит от температуры. Подвижность электронов также не зависит от температуры в данном интервале вследствие преобладания рассеяния на поверхности пленок, границах кристаллитов и дефектах структуры.

Относительное магнетосопротивление, а следовательно, и подвижность носителей заряда в пленках висмута, содержащего 0,05 ат% теллура, толщиной менее 0,4 мкм при изменении температуры остаются практически постоянными. Поэтому уменьшение удельного сопротивления и абсолютной величины коэффициента Холла при повышении температуры выше 110К указывает на увеличение концентрации носителей заряда вследствие температурного возбуждения электронно-дырочных пар. Важно отметить, что температурное возрастание концентрации носителей заряда становится заметным только в тонких пленках при существенном ограничении подвижности носителей заряда вследствие размерного эффекта. Оно незаметно на температурных зависимостях удельного сопротивления монокристаллов и достаточно толстых монокристаллических пленок висмута, легированного теллуrom, вследствие существенной температурной зависимости подвижности носителей заряда при рассеянии на фонах при температурах выше температуры Дебая [33,34].

**Глава 4 «Концентрации и подвижности носителей заряда в тонких пленках висмута»** содержит анализ явлений переноса на основе удельного сопротивления, магнетосопротивления, коэффициента Холла и термоэдс в тонких пленках полуметаллов. Для корректной интерпретации экспериментальных результатов используются данные комплексного исследования, выполненного в данной работе, учитывающего влияние различных факторов, обуславливающих те или иные закономерности явлений переноса в тонких пленках висмута, детальный контроль их структуры и обоснованное использование дополнительных приближений при расчете концентрации и подвижности носителей заряда. Детальное описание используемых приближений приводится вначале данной главы.

Для достаточно толстых пленок, толщиной 300 нм и более, для расчета подвижности носителей заряда использовалось в приближении соответствия концентраций электронов и дырок концентрациям в массивном монокристалле, которые уточнялись в связи с несоответствием температурного расширения висмута и подложки из слюды, исходя из данных, полученных в работах [22,35].

В случае независимости вкладов различных механизмов рассеяния в ограничение подвижностей носителей заряда фонами  $1/u_{ph}$ , поверхностью  $1/u_s$ , границами блоков и хиллоками  $1/u_G$  можно использовать правило Матиссена:

$$1/u = 1/u_{ph} + 1/u_s + 1/u_G. \quad (2)$$

Для анализа влияния размеров кристаллитов и концентрации хиллоков на подвижности дырок и электронов были построены зависимости  $1/u = f(1/G)$  для блочных пленок толщиной 300 нм. Как видно из рис. 13 и 14, эти зависимости близки к линейным. Экстраполяция этих зависимостей при

данной температуре к  $1/G \rightarrow 0$  дает значения подвижностей носителей заряда, обусловленные рассеянием на поверхности и на фононах, т.е. значения  $1/u_{ph} + 1/u_s$ .

Эти значения хорошо согласуются со значениями подвижностей носителей заряда монокристаллической пленки такой же толщины, как для электронов, так и для дырок (рис. 14, 15). Указанные результаты свидетельствуют о вкладе дополнительного механизма рассеяния дырок и электронов в блочных пленках висмута, который существенно зависит от размеров кристаллитов пленки и концентрации хиллоков. Угол наклона прямой  $1/u = f(1/G)$  для электронов меньше, чем для дырок, что указывает на более существенное ограничение подвижности дырок границами кристаллитов и хиллоками. При этом границы кристаллитов и хиллоки все-таки участвуют в ограничении подвижности как дырок, так и электронов, что является проявлением классического размерного эффекта на границах кристаллитов для всех типов носителей заряда в пленках висмута.

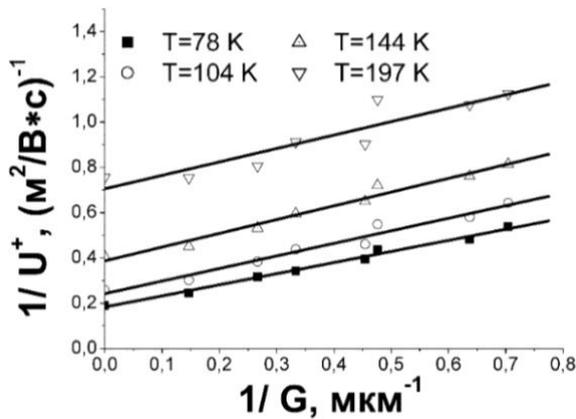


Рис. 14. Зависимость обратных значений подвижности дырок от  $1/G$  при различных температурах. Толщина пленок 300 нм.

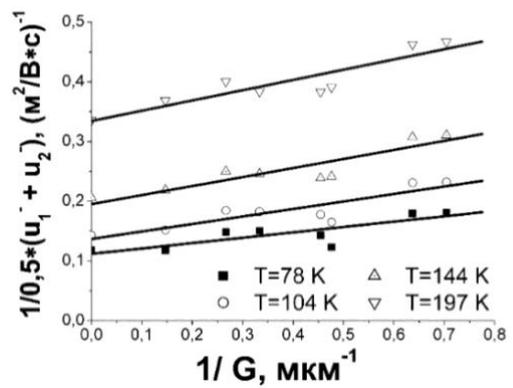


Рис. 15. Зависимость обратных значений средней подвижности электронов в плоскости подложки от  $1/G$  при различных температурах. Толщина пленок 300 нм.

Для анализа влияния толщины пленок на подвижности электронов и дырок были построены зависимости  $1/u = f(1/d)$  для различных значений температуры (рис. 16,17). Результаты экстраполяции на  $1/d \rightarrow 0$  соответствуют подвижностям носителей заряда в объемных монокристаллах при данной температуре, т.е. значению  $1/u_{ph}$ .

Обратим внимание на то, что  $1/u(d)$  для электронов существенно больше, чем  $1/u(d)$  для дырок. Данные по  $1/u(d)$  для электронов и дырок позволяют, руководствуясь теорией Фукса-Зондхаймера [36], определить параметр зеркальности  $p$  при взаимодействии электронов и дырок с поверхностью пленки. Проведенные расчёты показывают, что  $p_{эл} \approx 0.1$ , а  $p_{дыр} \approx 0.8$ .

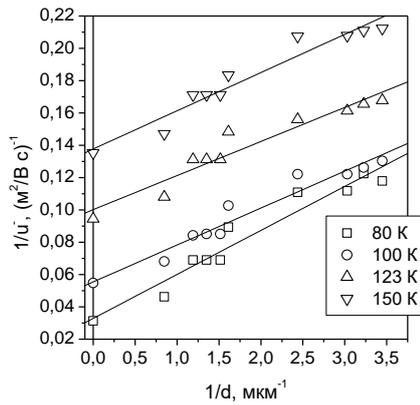


Рис. 16. Зависимость обратных значений средней подвижности электронов от обратной толщины для монокристаллических пленок висмута.  $u^- = 0.5(u_1^- + u_2^-)$ .

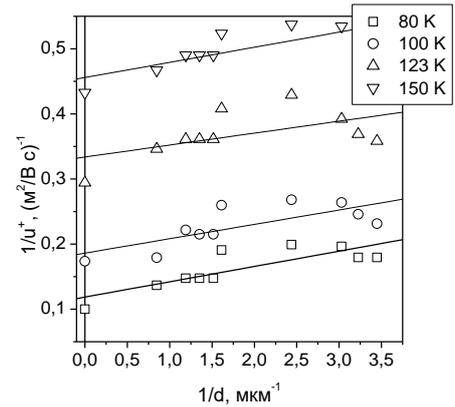


Рис. 17. Зависимость обратных значений подвижности дырок от обратной толщины для монокристаллических пленок висмута

Таким образом в пленках висмута (111) вблизи азотных температур ограничение подвижностей электронов связано, в основном, с взаимодействием с поверхностью пленки, а подвижностей дырок — с взаимодействием с границами блоков. Эту особенность можно использовать для регулирования значения термоэдс в пленках (111) висмута или твердого раствора висмут-сурьма, определяющую термоэлектрическую эффективность данных термоэлектрических материалов. В работе экспериментально показано, что, создавая тонкие пленки висмута, содержащие большую концентрацию границ кристаллитов, но при этом имеющие и достаточно совершенную внутреннюю структуру блоков, можно существенно увеличить значение термоэдс в пленочном состоянии. Создавая тонкие пленки с относительно большим размером кристаллитов, ограничивая тем самым подвижность электронов, возможно уменьшить абсолютное значение термоэдс и даже перевести ее в положительную область, что может быть использовано для создания р-ветви термоэлектрических преобразователей энергии в области низких температур.

В работах [37–39] теоретически предсказано, что благодаря квантовому размерному эффекту в кристаллах висмута должен наблюдаться переход полуметалл-полупроводник при размерах образцов порядка длины волны де-Бройля носителей заряда.

За последние несколько десятков лет были предприняты неоднократные попытки экспериментально установить переход полуметалл-полупроводник в тонких пленках и нитях висмута. Однако, несмотря на значительные усилия в этом направлении экспериментальные результаты и их интерпретация остаются неоднозначны.

В рамках настоящих исследований предпринята попытка установить причины данного противоречия. Расчет концентрации и подвижности носителей заряда проводился в приближении равенства концентраций электронов и дырок, описанном в четвертой главе.

В отдельных работах сообщается, что причиной роста концентрации носителей заряда в тонких пленках висмута может быть дополнительная

концентрация, обусловленная наличием свободной поверхности [16,40,41]. Это вполне разумное предположение, т. к. данная ситуация достаточно часто встречается в полупроводниках. Поскольку пленки висмута в большинстве случаев блочные, то дополнительная концентрация носителей заряда может формироваться и вследствие наличия границ кристаллитов. Тогда концентрация в пленке будет определяться выражением

$$n_{film} = n_{bulk} + n_{surface} \cdot d_{surface} \cdot \frac{1}{h} + n_{crystal\ bounder} \times d_{crystal\ bounder} \cdot 1/G, \quad (3)$$

где:  $n_{bulk}$  — концентрация в массивном монокристалле висмута;  $n_{surface}$  — дополнительная концентрация носителей заряда вследствие наличия свободной поверхности;  $d_{surface}$  — толщина поверхностного слоя, в котором формируется дополнительная концентрация носителей заряда;  $n_{crystal\ bounder}$  — дополнительная концентрация носителей заряда вследствие наличия границ кристаллитов;  $d_{crystal\ bounder}$  — толщина границ кристаллитов, в котором формируется дополнительная концентрация носителей заряда;  $h$  — толщина пленки;  $G$  — размер кристаллитов.

Таким образом, в случае формирования дополнительной концентрации носителей заряда на границах кристаллитов в пленке висмута для пленок фиксированной толщины, но имеющих различные размеры кристаллитов ее значения будут линейаризовываться в координатах  $n_{film}$  от  $1/G$ , а тангенс угла наклона прямой будет равен  $n_{crystal\ bounder} \cdot d_{crystal\ bounder}$ .

Аналогичная ситуация будет и в случае фиксированного значения размеров кристаллитов для пленок переменной толщины. В этом случае значения концентрации носителей заряда будут линейаризовываться в координатах  $n_{film}$  от  $1/h$ .

В соответствии с правилом Матиссена, уравнение (2), линейный вид зависимостей значений подвижностей в координатах  $1/u$  от  $1/G$  или  $1/u$  от  $1/h$  в случае фиксированной толщины или размеров кристаллитов соответственно может являться критерием справедливости используемых приближений, в том числе в данном случае предположения равенства концентрации электронов и дырок.

Технологически гораздо более просто изготовить серию пленок с фиксированной толщиной и переменным значением размеров кристаллитов по сравнению с серией пленок с фиксированным размером кристаллитов и переменной толщиной.

На рис. 18 приведены зависимости концентрации носителей заряда в координатах  $n$  от  $1/G$  для пленок толщиной 300 нм. Хорошо прослеживается увеличение концентрации носителей заряда при уменьшении размеров кристаллитов. Уравнение аппроксимирующей прямой имеет следующий вид:

$$n_{film} = 3.8 \cdot 10^{23} + 1.7 \cdot 10^{17} \frac{1}{G}. \quad (4)$$

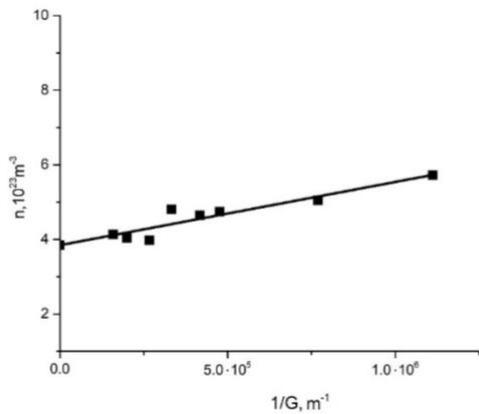


Рис. 18. Зависимость концентрации носителей заряда от  $1/G$  для пленок висмута толщиной 300 нм при 77 К.

рассчитаны концентрации и подвижности носителей заряда для пленок висмута толщиной от 15 до 300 нм.

На рисунке 19 приведены зависимости концентрации носителей заряда от обратной толщины пленки.

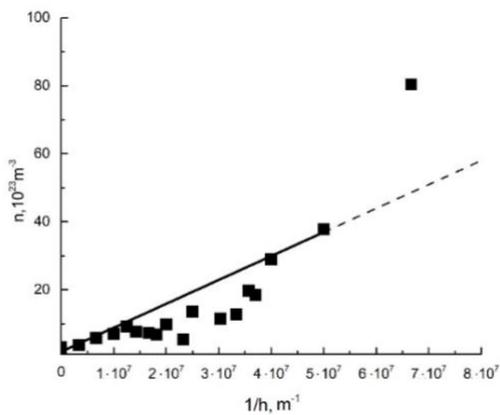


Рис. 19. Зависимость концентрации носителей заряда от  $1/h$  для пленок висмута при 77 К без дополнительной концентрации носителей заряда вследствие блочной структуры пленок

выполняется выражение (20). Далее в середине исследованного интервала толщин хорошо прослеживается уменьшение концентрации носителей заряда относительно линейной зависимости, характерной для более толстых пленок, но значения концентрации для более тонких пленок, кроме пленки толщиной 15 нм, возвращаются на данную прямую.

Уменьшение концентрации носителей заряда в середине интервала толщин обусловлено проявлением квантового размерного эффекта, который приводит к уменьшению концентрации носителей заряда в пленках полуметаллов. Для пленок толщиной 25 нм и менее, пленка переходит в «ультраквантовую область» с возможным изменением электронного энергетического спектра носителей заряда.

Сопоставляя выражения (3) и (4), можно получить, что произведение  $n_{crystal\ bounder} \cdot d_{crystal\ bounder} = 1.7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ , стандартная ошибка составляет  $0.2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ .

Рассчитанные значения подвижностей хорошо линейризуются в координатах  $1/u$  от  $1/G$ .

Аналогичным образом в приближении равенства концентраций электронов и дырок, описанном в четвертой главе, на основе измеренных гальваномагнитных свойств были рассчитаны концентрации и подвижности носителей заряда для пленок висмута толщиной от 15 до 300 нм. На рисунке 19 приведены зависимости концентрации носителей заряда от обратной толщины пленки. Так как пленки имели различные размеры кристаллитов в диапазоне от 0.4 до 6.3 мкм, с целью анализа экспериментальных данных из рассчитанных на основе измеренных коэффициентов переноса значений концентраций носителей заряда были исключены концентрации носителей заряда, обусловленные блочной структурой пленки и фактическим размером кристаллитов в пленке:

$$n_{crystal\ bounder} \cdot d_{crystal\ bounder} \cdot$$

С уменьшением толщины пленок наблюдается существенный рост концентрации носителей заряда. На участке, соответствующем пленкам толщиной больше 60 нм, хорошо

Уравнение аппроксимирующей прямой, представленной на рис. 18, имеет следующий вид:

$$n_{film} = 3 \cdot 10^{23} + 0.7 \cdot 10^{17} \frac{1}{h}. \quad (5)$$

Сопоставляя выражения (3) и (5), можно получить значение произведения  $n_{surface} \cdot d_{surface} = 0.7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ , стандартная ошибка составляет:  $0.02 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ .

Полученный вклад в дополнительную концентрацию носителей заряда в случае границы кристаллита почти в 2,5 раза больше по сравнению с поверхностью пленки, что вероятно обусловлено их различной структурой.

Концентрация носителей заряда в пленке толщиной 15 нм существенно выше по сравнению с линейной зависимостью  $n(1/h)$ , полученной для пленок большей толщины, что, вероятно, обусловлено существованием других, по отношению к обсуждаемым в данной работе механизмов, обеспечивающих рост концентрации носителей заряда.

Следует отметить, что рассчитанные значения подвижностей хорошо линеаризуются в координатах  $1/u$  от  $1/h$  только для пленок толщиной больше 25 нм. При этом учет уменьшения подвижностей носителей заряда вследствие их зависимостей при рассеянии на фононах от концентрации носителей заряда и ее росте при уменьшении толщины все равно не дает линейной зависимости в координатах  $1/u$  от  $1/h$  для пленок висмута данных толщин. Что вероятно обусловлено нарушением предположения равенства концентрации электронов и дырок для пленок висмута толщиной менее 25 нм.

Таким образом, причиной роста концентрации носителей заряда в пленках висмута при уменьшении толщины является дополнительная концентрация, обусловленная наличием свободной поверхности и границами кристаллитов. При этом, квантовый размерный эффект уменьшает концентрацию носителей заряда, что проявляется в уменьшении концентрации носителей заряда относительно линейной зависимости  $n$  от  $1/h$  характерной для толщин пленок при которых квантовый размерный эффект не проявляется. Для ультратонких пленок висмута (толщиной меньше 25 нм) существенное возрастание концентрации носителей заряда, возможно, осуществляется с нарушением равенства концентрации электронов и дырок. В ряде предыдущих работ также сообщалось о возможном нарушении равенства концентрации электронов и дырок в пленках висмута [42, 43].

С целью проверки данного предположения был проведен расчёт концентраций и подвижностей носителей заряда в пленках висмута с использованием измеренных значений удельного сопротивления, магнетосопротивления, коэффициента Холла и термоэдс пленок висмута в диапазоне толщин 15–250 нм при температуре 80 К. В данном случае уже не использовалось предположение равенства концентрации электронов и дырок. Более подробное описание используемого подхода приведено в тексте 4 главы диссертации.

Были использованы данные для массивного висмута при 80 К: концентрация носителей заряда ( $n_{\text{масс}} = 4.0 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ), парциальные термоэдс электронов и дырок ( $\alpha_{\text{масс}}^- = -100 \text{ мкВ/К}$ ,  $\alpha_{\text{масс}}^+ = 140 \text{ мкВ/К}$ ), а

также параметр рассеяния  $r_{\text{мас}} = -0.5$ . Выбор этого значения обусловлен преимущественным рассеянием носителей заряда на акустических фононах в массивном висмуте при температуре 80 К [20]. При толщинах пленки меньше 27 нм согласованные для различных толщин результаты расчета концентрации и подвижности носителей заряда наблюдается только в случае  $r_{\text{пленк}} = 0$  как для электронов, так и для дырок. Для более толстых пленок в случае электронов параметр рассеяния также равен нулю, а в случае дырок необходимо его постепенное уменьшение. Для пленки толщиной 250 нм оно составляло  $-0,3$ , что, по-видимому, обусловлено большей зеркальностью поверхности в случае дырок по сравнению с электронами. Значения параметров рассеяния носителей заряда представлены на рис. 20.

На рис. 21 приведены зависимости концентрации электронов и дырок от толщины пленки. Видно, что в случае пленок толщиной меньше 30 нм рост концентрации носителей заряда происходит с нарушением равенства концентрации электронов и дырок и более сильным ростом концентрации дырок по отношению к электронам.

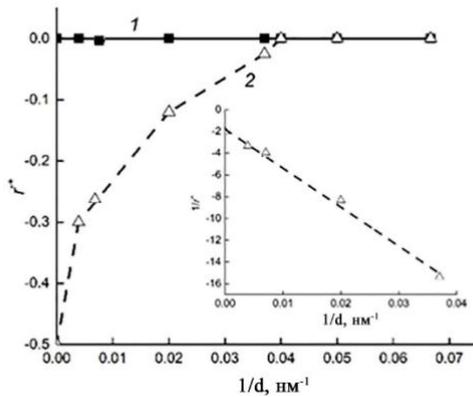


Рис. 20. Зависимость параметра рассеяния электронов  $r^-$  (1) и дырок  $r^+$  (2) от обратной толщины пленок висмута. На – вставке зависимость обратного значения параметра рассеяния дырок от обратной толщины пленок висмута.

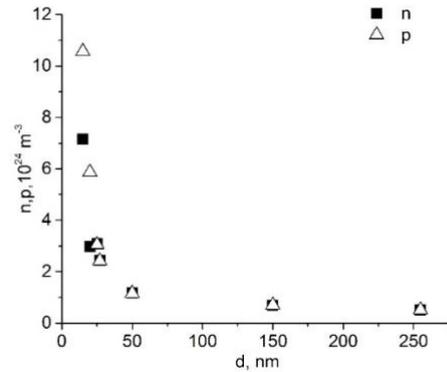


Рис. 21. Зависимость концентрации электронов и дырок для пленок висмута от толщины.

Корректность полученных зависимостей концентраций носителей заряда от толщины пленок висмута можно проверить, используя полученные в расчетах значения подвижности и их изменения с толщиной с учетом рассеяния на границах кристаллитов и размеров кристаллитов в пленке. При этом, если концентрация носителей заряда зависит от толщины пленки, то рассеяние на фононах также становится функцией толщины пленки аналогично тому, как это происходит при росте концентрации носителей заряда в массивном висмуте вследствие повышения температуры или вследствие легирования [20]. В этом случае для электронов и дырок соответственно:

$$u_{\text{фон}}^- \sim \frac{1}{n}, u_{\text{фон}}^+ \sim \frac{1}{p}. \quad (6)$$

Линейный вид зависимостей значений подвижности тонких пленок висмута в координатах  $1/u$  от  $1/h$  с учетом описанных дополнительных вкладов

в рассеяния носителей заряда может являться критерием справедливости используемых подходов для расчета концентрации носителей заряда в тонких пленках.

На рис. 22 (заполненные символы) представлены полученные в рамках численного решения системы уравнений (2)–(5), (16), (11), зависимости обратных значений подвижности электронов и дырок от обратной толщины пленок висмута.

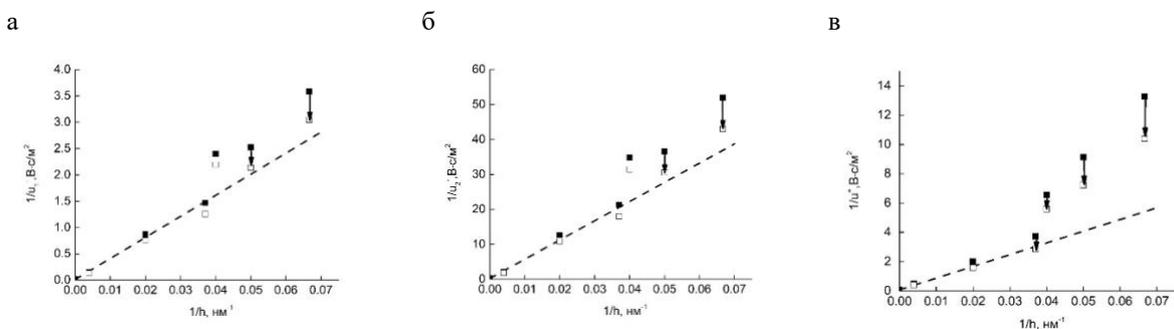


Рис. 22. Зависимость обратных значений подвижности электронов  $1/u_1^-$  (а),  $1/u_2^-$  (б) и дырок  $1/u^+$  (в) от обратной толщины.

Пунктирной линией приведены зависимости, характерные для достаточно толстых пленок висмута на слюде. Видно, что в случае малых толщин полученные значения подвижности отклоняются от зависимости, характерной для толстых пленок. Однако, если исключить из обратных значений подвижности вклад рассеяния, обусловленного границами блоков используя при этом размеры кристаллитов в данных пленках и дополнительное рассеяние фононами, обусловленное ростом концентрации носителей заряда, то полученные обратные значения подвижности электронов (рис. 22 квадратные незаполненные символы) в большинстве случаев достаточно хорошо соответствуют линейным зависимостям. В случае дырок (рис. 22 в, треугольные незаполненные символы) учет описанных механизмов не дает полного согласия подвижности пленок толщиной меньше 25 нм и более толстых пленок висмута. Оставшееся небольшое несоответствие, по-видимому, обусловлено формированием менее совершенных границ блоков в пленках толщиной менее 25 нм по сравнению с более толстыми аналогами. Вследствие более сильного подавления границами блоков подвижности дырок по сравнению с подвижностью электронов это изменение становится заметным именно в случае дырок.

Таким образом, анализ гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонких пленок висмута на слюде при температуре 80 К указывает на возрастание концентрации носителей заряда при уменьшении толщины пленки и нарушение равенства концентрации электронов и дырок при толщинах меньше 30 нм. Повышенная концентрация дырок в приповерхностной области может являться причиной меньшего рассеяния поверхностью дырок по сравнению с электронами.

**Глава 5 «Особенности проявления квантового размерного эффекта и изменение зонного спектра носителей заряда в тонких пленках висмута»** посвящена анализу экспериментальных результатов по

исследованию квантового размерного эффекта в тонких пленках висмута, а также изменениям энергетического спектра носителей заряда в тонких пленках висмута.

В висмуте вследствие большой длины волны фермиевских электронов  $\lambda_F$  ( $\sim 40$  нм) очень широко исследуется квантовый размерный эффект (КРЭ). Несмотря на экспериментальное подтверждение квантового размерного эффекта на качественном уровне, количественная интерпретация экспериментальных результатов в полуметаллах типа висмута вызывает большие трудности. Основные проблемы, возникающие при сравнении теоретических предсказаний с экспериментальными результатами отражены в разделе автореферата, посвященного актуальности работы.

Трудности наблюдения и интерпретации КРЭ в висмуте обусловлены многодолинной зонной структурой, большой анизотропией физических свойств и сложностью получения монокристаллических пленок с заданной контролируемой кристаллографической ориентацией. В пленках висмута (111) размерное квантование определяется энергетическим спектром электронов и дырок в направлении оси  $C_3$ , длина волны де Бройля  $\lambda_3 = \hbar/\sqrt{2E_F m_3^*}$  для которых при 77 К составляет 67 и 11 нм соответственно.

В 3 главе представлены зависимости гальваномагнитных свойств от толщины пленки при температуре 77 К. Для пленок толщиной меньше 60 нм зависимость указанных свойств от толщины пленки носит осциллирующий характер с периодом 12–13 нм, что существенно меньше предполагаемых значений для электронов, соответствующих  $\lambda_3/2 \sim 30$  нм для массивного висмута.

С целью выяснения причин отличия теоретически предсказанного и экспериментально наблюдаемого значения периода осцилляций на основе измеренных электрических и гальваномагнитных коэффициентов (удельное сопротивление  $\sigma$ , магнетосопротивление  $\Delta\rho/B^2$ , коэффициент Холла  $R$ ) в предположении равенства концентраций электронов и дырок и изотропности длины свободного пробега носителей заряда в плоскости подложки произведена оценка концентрации и подвижности носителей заряда в исследуемых тонких пленках висмута.

На рис. 23 представлена зависимость концентрации и подвижности носителей заряда в пленках висмута от толщины. В пленках висмута толщиной более 50 нм концентрация носителей заряда близка к ее значениям в массивном монокристалле висмута. При уменьшении толщины пленок висмута концентрация носителей заряда возрастает по отношению к массивному висмуту, и ее рост достигает десятикратного значения для пленки толщиной 15 нм.

Очевидно, что такой рост концентрации должен сказаться на длине волны де Бройля  $\lambda$  носителей заряда. С использованием соотношения энергии Ферми  $E_F$ , концентрации  $n$  и эффективной массы  $m^*$  носителей заряда для вырожденного электронного газа в трехмерном случае

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m^*} (3\pi^2 n)^{2/3} \quad (7)$$

и выражения для длины волны де Бройля:  $\lambda = h/\sqrt{2E_F m^*}$  получим, что

$$\lambda = 2\pi/(3\pi^2 n)^{1/3}, \text{ т. е. } \lambda \sim 1/\sqrt[3]{n}. \quad (8)$$

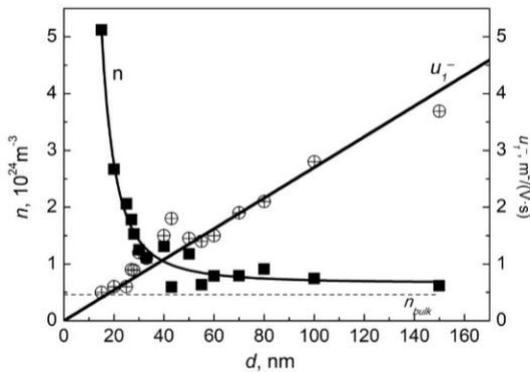


Рис. 23. Зависимость концентрации  $n$  и подвижности  $u_1^-$  носителей заряда от толщины  $d$  пленок висмута

При росте концентрации носителей заряда на порядок,  $\lambda$  для электронов уменьшается более, чем в 2 раза и составляет в направлении оси  $C_3$  примерно 30 нм, таким образом, период квантовых осцилляций в этом случае должен составлять порядка 15 нм. С учетом грубости представленных оценок полученное значение  $\lambda$  можно считать находящимся в удовлетворительном соответствии с периодом осцилляций, наблюдаемом в данном эксперименте.

Электронный спектр кристаллов висмута весьма чувствителен к различным воздействиям, помимо толщины пленок на него оказывают влияние и деформации, обусловленные различным температурным расширением материала пленки и подложки [35]. Поэтому при сравнении периода осцилляций в пленках висмута (111) следует проводить с учетом как минимум 2 факторов:

- диапазон толщин, в которых наблюдаются квантовый размерный эффект,
- температурный коэффициент материала подложки.

Наиболее часто используемая подложка для получения пленок висмута при исследовании квантового размерного эффекта является слюда. Значение длины де Бройля электронов в пленке висмута на слюде с учетом деформации пленки, обусловленной различным температурным расширением висмута и слюды, приводящий к уменьшению на 20% концентрации носителей заряда [35], в соответствии с формулой 8 составляет 72 нм. В работе Ю. Ф. Огрини и др. осцилляции наблюдались в диапазоне толщин от 70 до 150 нм с периодом осцилляций около 40 нм [5]. В более поздней работе [44] диапазон толщин пленок висмута, при которых наблюдались осцилляции был расширен почти до 400 нм, период осцилляций так же составлял около 40 нм. В работе Ю.Ф. Комника и др. [19] отчетливые осцилляции сопротивления в пленках висмута на этой же подложке наблюдались в диапазоне толщин пленок 250 – 320 нм, более слабые в диапазоне 150-250 нм с периодом около 35 нм. Указанный период осцилляций примерно соответствует длине де Бройля электронов в пленке висмута на слюде при отсутствии влияния поверхности на концентрацию носителей заряда. При этом, как было показано выше, рост концентрации носителей заряда в пленках висмута вследствие влияния поверхности происходит при меньших толщинах.

В работе N. Garcia и др. [45] исследовалось сопротивление плёнок висмута на слюде в диапазоне толщин от 20 до 140 нм. Наиболее выраженные осцилляции наблюдались в пленках в диапазоне толщин от 25 до 55 нм с периодом около 14 нм, что соответствует уменьшению длины де Бройля

электронов (формула 8) вследствие роста концентрации носителей заряда в пленке в связи с влиянием ее поверхности и границами кристаллитов. Зависимость периода осцилляций от толщины пленки также была получена в работе [46].

При анализе наблюдаемого периода осцилляций в рамках квантового размерного эффекта обязательным является учет кристаллографической ориентации пленок висмута. Предыдущий анализ проведен для пленок с ориентацией плоскости (111) параллельно плоскости пленки. Однако в работе [47] показано, что осцилляции вследствие квантового размерного эффекта могут наблюдаться и в нетекстурированных поликристаллических пленках висмута. При этом в модели сформировавшейся изотропии свойств висмута период осцилляций составляет 22 нм для электронов и 16 нм для дырок [47].

Приведенный анализ показывает, что причиной существенного расхождения периода осцилляций у разных авторов при наблюдении квантового размерного эффекта является различная степень изменения электронного спектра тонких пленок по отношению к массивному висмуту.

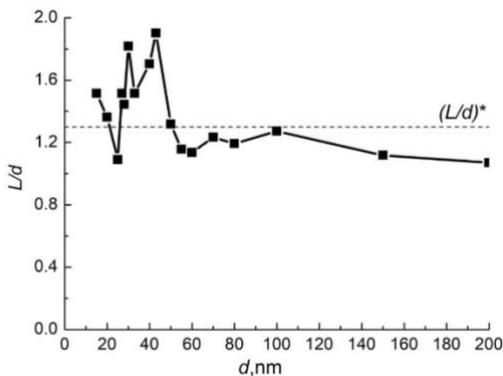


Рис. 24. Зависимость отношения длины свободного пробега к толщине от толщины пленки висмута

висмута. Несмотря на существенный разброс полученных значений, хорошо просматривается слабая тенденция к уменьшению отношения длины свободного пробега электронов к толщине пленки при увеличении последней. Эта тенденция находится в полном согласии со структурными исследованиями полученных пленок.

На рис. 24 можно выделить некий уровень  $(L/d)^*$ , обозначенный пунктирной линией, ниже которого КРЭ перестает наблюдаться. В нашем эксперименте это наблюдается для пленок толщиной больше 50 нм. Уменьшение соотношения  $L/d$  с толщиной и достижение некоторого критического его значения, по-видимому, и является причиной резкого прекращения проявления квантового размерного эффекта. Используя приближение изотропности времени релаксации для висмута и значения эффективных масс электронов в массивном висмуте легко получить:

$$\frac{L_1^-}{L_3^-} = \sqrt{\frac{m_3^*}{m_1^*}} \approx 1.35 \quad . (10)$$

Видно, что полученное значение хорошо совпадает с экспериментально наблюдаемым критическим значением  $(L/d)^*$ , при котором толщина пленки становится больше длины свободного пробега электронов и пропадает проявление квантового размерного эффекта.

Вследствие малой скорости уменьшения  $L/d$  при увеличении толщины пленки небольшое изменение качества структуры тонких пленок будет приводить к существенному изменению максимальной толщины, при которой проявляется КРЭ в тонких пленках висмута. По-видимому, это является одной из причин большого разнообразия в различных экспериментальных работах интервала толщин, при которых наблюдается КРЭ для пленок висмута, полученных даже в схожих условиях.

Основываясь на полученных в четвертой главе значениях, концентрации электронов и дырок определены положения энергетических экстремумов валентной зоны и зоны проводимости относительно уровня химпотенциала. Для плёнки висмута толщиной 15 нм перекрытие валентной зоны и зоны проводимости составляет почти 300 мэВ [48], что соответствует усилению металлических свойств поверхности (111) висмута по отношению к его объему, о котором сообщается во многих работах, посвящённых расчёту зонной структуры поверхности (111) висмута из первых принципов, а также ее исследованию методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) [16].

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы по проведенному исследованию.

1. В результате впервые проведенных комплексных исследований квантового размерного эффекта, в том числе с детальным контролем структуры и концентрации дефектов (границ кристаллитов и хиллоков) тонких пленок, показано, что учет вкладов поверхности, границ кристаллитов и хиллоков в изменение подвижности носителей заряда, учет вкладов поверхности, границ кристаллитов, хиллоков и механических деформаций в изменение концентрации носителей заряда, позволяет непротиворечиво объяснить наблюдаемые в рамках данной работы и описанные в литературе закономерности проявления квантового размерного эффекта в гальваномагнитных свойствах тонких пленок висмута.

2. Установлено влияние хиллоков на гальваномагнитные свойства пленок висмута, заключающееся в ограничении подвижности носителей заряда. Таким образом, классический размерный эффект в пленках висмута на слюде, полученных методом термического испарения в вакууме, приводит к ограничению подвижностей носителей заряда при взаимодействии с поверхностью, границами блоков и хиллоков.

3. Показано, что в тонких пленках висмута (111) подвижность электронов в большей степени ограничивается поверхностью пленки, а подвижность дырок — границами блоков и хиллоков. Указанный эффект может быть использован для значительного изменения термоэдс пленок висмута и твердого раствора висмут-сурьма вблизи азотных температур путем создания образцов заданной толщины с заданными размерами кристаллитов и

концентрацией хиллоков. Контролируя ограничение подвижности электронов и дырок поверхностью и границами кристаллитов, можно как увеличить, так и уменьшить значения термоэдс для пленок висмута по отношению к значениям термоэдс массивного кристалла висмута. Для пленок висмута при температуре около 100 К увеличение абсолютного значения термоэдс в плоскости (111) может достигать 30%. В случае пленок висмута или твердого раствора висмут-сурьма малой толщины с высокосовершенной кристаллической структурой возможно перевести термоэдс из отрицательных значений в положительную область.

4. Обнаружено, что уменьшение толщины пленки висмута на слюде менее 40 нм сопровождается появлением области с металлическим температурным ходом удельного сопротивления при низких температурах, которая при уменьшении толщины пленок сдвигается в область более высоких температур.

5. На температурной зависимости магнетосопротивления тонких пленок висмута на слюде впервые обнаружен максимум, не характерный для монокристаллов висмута. Указанный максимум смещается в область более высокой температуры с уменьшением толщины пленки. Обнаруженная аномалия может быть проявлением эффекта слабой локализации электронов.

6. В рамках данной работы показано, что осцилляции значений удельного сопротивления, магнетосопротивления и коэффициента Холла на функциональных зависимостях этих параметров от толщины пленки в крупноблочных пленках висмута, синтезированных на слюде с ориентацией плоскости (111) кристаллитов пленки параллельно плоскости подложки, являются проявлением квантового размерного эффекта при толщинах пленок, сравнимых с длиной волны де Бройля электронов в направлении оси  $C_3$  и не могут быть обусловлены различным качеством структуры пленок висмута.

7. Показано, что концентрация носителей заряда в тонких пленках висмута на слюде увеличивается при уменьшении их толщины, что приводит к меньшему значению периода осцилляций по отношению к половине длины волны де Бройля электронов в массивном висмуте на функциональных зависимостях электрических и гальваномагнитных свойств от толщины пленки вследствие квантового размерного эффекта. Уменьшение концентрации носителей заряда в тонких пленках висмута, например, вследствие ее механической деформации, возникающей при низкой температуре в случае меньшего температурного расширения материала подложки по отношению к висмуту, приводит к обратному эффекту – увеличению периода осцилляций. Таким образом, период осцилляций гальваномагнитных свойств пленок, обусловленный квантовым размерным эффектом, может изменяться до 2,5 раз вследствие указанных причин.

8. Возрастание концентрации носителей заряда для толщин пленок меньше 25 нм происходит с более сильным ростом концентрации дырок по отношению к электронам.

9. В рамках данной работы показано, что интервал толщин, в которых наблюдаются осцилляции квантового размерного эффекта,

ограничивается со стороны малых толщин условием меньшей толщины пленки по отношению к половине длины волны де Бройля носителей заряда в данных пленках, а со стороны больших толщин – условием меньшей толщины пленки по отношению к длине свободного пробега носителей заряда в данных пленках в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, при этом реализация последнего условия достаточно чувствительна к структуре пленки висмута, определяемой условиями ее получения.

**Основные результаты исследования опубликованы в работах:**

*Монография:*

1. Демидов, Е.В. Гальваномагнитные и термоэлектрические явления в тонких пленках висмута и сплавов висмут-сурьма: Монография / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, А. Н. Крушельницкий, А. В. Суслов, В. А. Герега. — 2-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2021. — 196 с. (12,25 п.л./5 п.л.).

*Статьи в рецензируемых научных изданиях и научных изданиях, индексируемых в международных базах данных, рекомендованных ВАК:*

2. Demidov, E.V. Size effects in the galvanomagnetic and thermoelectric properties of ultrathin bismuth-antimony films / V. A. Gerega, A. V. Suslov, V. A. Komarov, V.M. Grabov, E.V. Demidov, R. S. Stepanov, A. V. Rodionov, A. V. Kolobov. // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. – 2023. – № 1.1 (16). – P. 9-15. (WoS) . (0,4375 п.л./0,1875 п.л.).

3. Демидов, Е.В. О проблеме расчета концентрации и подвижности носителей заряда в тонких пленках висмута и твердого раствора висмут-сурьма / Демидов Е. В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. - № 9. – С. 48-56. Переводная версия: Demidov E. V. On the Problem of Calculating the Concentration and Mobility of Charge Carriers in Thin Bismuth Films and a Bismuth–Antimony Solid Solution / Demidov E. V. // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2022. – № 5 (16). – P. 712-719. (Scopus) (0,562 п.л.).

4. Демидов, Е.В. Рост концентрации носителей заряда в тонких пленках висмута / Е. В. Демидов, В. М. Грабов, В. А. Комаров, А. В. Суслов, В. А. Герега, А.Н. Крушельницкий // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Том 56, № 2. – С. 149-155. (Scopus) (0,4375 п.л./0,25 п.л.).

5. Демидов, Е.В. Деформация тонких пленок полуметаллов методом купольного изгиба подложки / А. В. Суслов, В. А. Герега, В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Том 56. – № 2. – С. 178-181 Переводная версия: Deformation of Thin Films of Semimetals by the Dome Bending Method of the Substrate / A. V. Suslov, V. A. Gerega, V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov // Semiconductors. – 2022. – Vol. 56, No 1. – P. 22-24. (Scopus) (0,25 п.л./0,0625 п.л.).

6. Демидов, Е.В. Гальваномагнитные свойства и термоэдс ультратонких пленок системы висмут-сурьма на подложке из слюды / В. А. Гергега, А. В. Суслов, В. А. Комаров, В. М. Грабов, Е. В. Демидов, А. В. Колобов // *Физика и техника полупроводников*. – 2022. – № 1 (56). – С. 42-47. Переводная версия: *On the Galvanomagnetic Properties and Thermoelectric Power of Ultrathin Films of the Bismuth–Antimony System on a Mica Substrate* / V. A. Gerega, A. V. Suslov, V. A. Komarov, V. M. Grabov, E. V. Demidov, A. V. Kolobov // *Semiconductors*. – 2022. – № 5 (56). – P. 310-316. (Scopus) (0,375 п.л./0,1875 п.л.).
7. Демидов, Е.В. Гальваномагнитные свойства пленок системы висмут–сурьма в условиях деформации плоскостного растяжения / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, С. В. Сенкевич, А. В. Суслов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2021. - № 7. – С. 108-112. Переводная версия: *Galvaomagnetic Properties of Bismuth–Antimony Films under Conditions of Plane Tensile Strain* / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov, A.V. Suslov, S. V. Senkevich S.V. // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2021. – No. 4 (15). – P. 777-780. (Scopus) (0,3125 п.л./0,1875 п.л.).
8. Демидов, Е.В. Термо-ЭДС тонких пленок висмута на слюде / В. А. Гергега, В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, А. В. Суслов, М. В. Суслов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2021. - №5. – С. 63-67/ Переводная версия: *Thermoelectric Power of Thin Bismuth Films on Mica* / V. A. Gerega, V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov, A. V. Suslov, M. V. Suslov. // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2021. - № 3 (15). – P. 467–470. (Scopus) (0,3125 п.л./0,1875 п.л.).
9. Демидов, Е.В. Атомно-силовая микроскопия и электрические свойства монокристаллических пленок висмута / В. М. Грабов, В. А. Гергега, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, М. В. Старицын, А. В. Суслов, М. В. Суслов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2020. - № 9. – С. 55-60. Переводная версия: *On the Atomic-Force Microscopy and Electrical Properties of Single-Crystal Bismuth Films* / V. M. Grabov, V. A. Gerega, E. V. Demidov, V. A. Komarov, M. V. Starytsin, A. V. Suslov, M. V. Suslov // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2020. - № 5 (14). – P. 913–917. (Scopus) (0,375 п.л./0,1875 п.л.).
10. Демидов, Е.В. Особенности проявления квантового размерного эффекта в явлениях переноса в тонких пленках висмута на подложках из слюды / Е. В. Демидов, В. М. Грабов, В. А. Комаров, А. Н. Крушельницкий, А. В. Суслов, М. В. Суслов // *Физика и техника полупроводников*. – 2019. - № 6 (53). – С.736-740. Переводная версия: *Specific Features of the Quantum-Size Effect in Transport Phenomena in Bismuth-Thin Films on Mica Substrates* / E. V. Demidov, V. M. Grabov,

V. A. Komarov, A. N. Krushelnitskii, A. V. Suslov, M. V. Suslov // *Semiconductors*. – 2019. - № 6 (53). – P. 727–731. (Scopus) (0,3125 п.л./0,1875 п.л.).

11. Демидов, Е.В. Термоэдс тонких пленок  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.15$ ) на подложках из слюды и полиимида в температурном интервале 77-300 К / М. В. Суслов, В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Демидов, С. В. Сенкевич, А. В. Суслов // *Физика и техника полупроводников*. – 2019. – № 5 (53). – С. 593-596. Переводная версия: *The Thermoelectric Power of  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  Films ( $0 \leq x \leq 0.15$ ) on Mica and Polyimide Substrates in the Temperature Range of 77–300 K* / M. V. Suslov, V. M. Grabov, V.A. Komarov, E. V. Demidov, S. V. Senkevich, A. V. Suslov // *Semiconductors*. – 2019. – № 5 (53)., P 589–592. (Scopus) (0,25 п.л./0,062 п.л.).

12. Демидов, Е.В. Параметры зонной структуры тонких пленок  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.15$ ) на подложках с различным температурным расширением / А. В. Суслов, В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Демидов, С. В. Сенкевич, М. В. Суслов // *Физика и техника полупроводников*. – 2019. - № 5 (53). – С. 616-619. Переводная версия: *The Band-Structure Parameters of  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.15$ ) Thin Films on Substrates with Different Thermal-Expansion Coefficients* / A. V. Suslov, V. M. Grabov, V. A. Komarov, E. V. Demidov, S. V. Senkevich, M. V. Suslov // *Semiconductors*. – 2019. - № 5 (53). - P. 611–614. (Scopus) (0,25 п.л./0,125 п.л.).

13. Демидов, Е.В. Гальваномагнитные свойства тонких пленок  $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$  на подложках с различным температурным расширением / В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Демидов, А. В. Суслов, М. В. Суслов // *Письма в ЖТФ*. – 2018. - № 11 (44). - С. 71-79. Переводная версия: *Galvanomagnetic properties of  $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$  thin films on substrates with different thermal expansions* / V.M. Grabov, V.A. Komarov, E.V. Demidov, A.V. Suslov, M.V. Suslov // *Technical Physics Letters*. - 2018. - №6 (44). – P. 487-490. (Scopus) (0,5625 п.л./0,1875 п.л.).

14. Демидов, Е.В. Состояние топологического изолятора в тонких пленках висмута под воздействием плоскостной деформации растяжения / Е. В. Демидов, В. М. Грабов, В. А. Комаров, Н. С. Каблукова, А. Н. Крушельницкий // *Физика твердого тела*. – 2018. - №3 (60). – С. 452-455. Переводная версия: *Topological insulator state in thin bismuth films subjected to plane tensile strain* / E. V. Demidov, V. M. Grabov, V. A. Komarov, N. S. Kablukova, A. N. Krushelnitskii // *Physics of the Solid State*. – 2018. - №3 (60). - P. 457-460. (Scopus) (0,25 п.л./0,062 п.л.).

15. Demidov, E.V. Temperature dependences of galvanomagnetic coefficients of bismuth-antimony thin films 0-15 at.% sb on substrates with different temperature expansion / V. M. Grabov, V. A. Komarov, E. V. Demidov, S.V. Senkevich, A.V. Suslov, M. V. Suslov // *Университетский научный журнал*. – 2017. - № 35. – С. 48-57. (0,625 п.л./0,3125 п.л.).

16. Demidov, E.V. The Galvanomagnetic Properties of Bismuth Films with Thicknesses of 15–150 nm on Mica Substrates / V. M. Grabov, V. A. Komarov,

E. V. Demidov, A. N. Krushelnitckii, N. S. Kablukova // Университетский научный журнал. – 2017. - №. 27. – С. 56–68. (0,8125 п.л./0,4375 п.л.).

17. Демидов, Е.В. Структура пленок висмута, полученных с применением предварительно сформированного на подложке ансамбля одинаково ориентированных монокристаллических островков висмута / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, Е. К. Иванова, Н. С. Каблукова, А. Н. Крушельницкий, С. В. Сенкевич // Физика и техника полупроводников. – 2017. - №7 (51). – С. 867-869. Переводная версия: Structure of bismuth films obtained using an array of identically oriented single-crystal bismuth islands preliminarily grown on a substrate / V. M. Grabov, E. V. Demidov, E. K. Ivanova, N. S. Kablukova, A. N. Krushelnitckii, S. V. Senkevich // Semiconductors. – 2017. - №7 (51). – P. 831-833. (Scopus) (0,1875 п.л/0,125 п.л.).

18. Демидов, Е. В. Измерение толщины блочных пленок висмута методом атомно-силовой микроскопии с применением избирательного химического травления / Е. В. Демидов, В. А. Комаров, А. Н. Крушельницкий, А. В. Суслов // Физика и техника полупроводников. – 2017. - №7 (51). – С.877-879. Переводная версия: Measurement of the thickness of block-structured bismuth films by atomic-force microscopy combined with selective chemical etching / E. V. Demidov, V. A. Komarov, A. N. Krushelnitckii, A. V. Suslov // Semiconductors. – 2017. - № 7 (51). – P. 840-842. (Scopus) (0,188 п.л/0,125 п.л.).

19. Демидов, Е. В. Зависимость морфологии поверхности ультратонких пленок висмута на слюдяной подложке от толщины пленки / А. Н. Крушельницкий, Е. В. Демидов, Е. К. Иванова, Н. С. Каблукова, В. А. Комаров // Физика и техника полупроводников. - 2017. - № 7 (51). - С. 914-916. Переводная версия: Dependence of the surface morphology of ultrathin bismuth films on mica substrates on the film thickness / A. N. Krushelnitckii, E. V. Demidov, E. K. Ivanova, N. S. Kablukova, V. A. Komarov // Semiconductors. – 2017. - № 7 (51). - P. 876-878. (Scopus) (0,1875 п.л/0,0625 п.л.).

20. Демидов, Е. В. Влияние отжига при температуре выше температуры солидуса на структуру и гальваномагнитные свойства тонких пленок твердого раствора  $\text{Bi}_{92}\text{Sb}_8$  / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, Е. К. Иванова, В. А. Комаров, Н. С. Каблукова, А. Н. Крушельницкий, М. В. Старицын // Журнал технической физики. – 2017. - № 7 (87). – С. 1071-1077. Переводная версия: Influence of annealing at temperatures above the solidus temperature on the structure and galvanomagnetic properties of  $\text{Bi}_{92}\text{Sb}_8$  solid-solution thin films / V. M. Grabov, E. V. Demidov, E. K. Ivanova, V. A. Komarov, N. S. Kablukova, A. N. Krushel'nitskii, M. V. Staritsyn // Technical Physics. - 2017. - № 7 (62). – P. 1087–1092. (Scopus) (0,4375 п.л./0,25 п.л.).

21. Демидов, Е. В. Пористое стекло в качестве реактора синтеза наночастиц висмута / В. Н. Пак, О. В. Голов, В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. М. Стожаров // Журнал общей химии. – 2015. - № 10 (85). - С. 1600-1604.

Переводная версия: Porous Glass as Reactor for Preparation of Bismuth Nanoparticles / V. N. Pak, O. V. Golov, V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. M. Stozharov // Russian Journal of General Chemistry. - № 10 (85). – P. 2233-2237. (Scopus) (0,3125 п.л./0,125 п.л.).

22. Демидов, Е. В. Использование метода зонной перекристаллизации под покрытием для получения монокристаллических пленок твердого раствора висмут-сурьма / В. М. Грабов, В. А. Комаров, Н. С. Каблукова, Е. В. Демидов, А. Н. Крушельницкий // Письма в журнал технической физики. - 2015. – Том 41, № 1. – С. 20-27. Переводная версия: The use of the method of zone recrystallization under a coating for preparing single-crystal films of bismuth-antimony solid solution / V. M. Grabov, V. A. Komarov, N. S. Kablukova, E. V. Demidov, A. N. Krushelnitskii // Technical Physics Letters. – 2015. - № 41 (1). – P. 10-13. (Scopus) (0,5 п.л./0,3125 п.л.).

23. Демидов, Е. В. Размерный эффект в гальваномагнитных явлениях в пленках висмута, легированного теллуром / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Д. Ю. Матвеев, А. А. Николаева, Д. Маркушев, Е. В. Константинов, Е. Е. Константинова // Физика и техника полупроводников. – 2014. - №5 (48). - С. 648-653. Переводная версия: Size effect in galvanomagnetic phenomena in bismuth films doped with tellurium / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov, D. Yu. Matveev, A. A. Nikolaeva, D. Markushevs, E. V. Konstantinov, E. E. Konstantinova // Semiconductors. - 2014. - № 48 (5). – P. 630-635. (Scopus) (0,375 п.л./ 0,25 п.л.).

24. Демидов, Е. В. Гальваномагнитные свойства тонких плёнок висмута, легированного теллуром, полученных методом термического испарения в вакууме / В. А. Комаров, Д. Ю. Матвеев, Е. В. Демидов, А. Н. Крушельницкий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. - № 1. – С. 113-118. (Scopus) (0,375 п.л./0,25 п.л.)

25. Демидов, Е. В. Влияние линейного расширения материала подложки на явления переноса в блочных и монокристаллических пленках системы висмут-сурьма / Н. С. Каблукова, В. А. Комаров, Е. В. Демидов, Е. Е. Христинич // Известия Российского государственного педагогического университета имени А.И. Герцена. – 2012. - № 153 (2). - С. 13-19. (0,438 п.л./0,1875 п.л.).

26. Демидов, Е. В. Ограничение подвижности носителей заряда в пленках висмута, обусловленное их блочной структурой / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2011. - №2. – С. 81-85. Переводная версия: Mobility Restriction of Charge Carriers in Bismuth Films Due to Film Block Structure / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. - 2011. - №1. – P. 177-181. (Scopus) (0,312 п.л./0,1875 п.л.).

27. Демидов, Е. В. Моделирование процесса роста пленок висмута на подложке из слюды / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, Е. В. Усынин // Известия

Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Серия: Естественные и точные науки. - 2011. - № 138. – С. 35-44. (0,625 п.л./0,375 п.л.).

28. Демидов, Е. В. Спектры отражения кристаллов и пленок полуметаллов на основе висмута в области плазменных частот / А. С. Мальцев, Е. В. Демидов, А. В. Басов, К. В. Панков // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена. Серия: Естественные и точные науки. – 2010. - № 135. - С. 44-53. (0,625 п.л./0,375 п.л.).

29. Демидов, Е. В. Оптимизация режимов термического осаждения в вакууме пленок висмута при контроле их дефектности методом атомно-силовой микроскопии / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров // Физика твердого тела. – 2010. - № 6 (52). – С. 1219-1222. Переводная версия: Optimization of the conditions for vacuum thermal deposition of bismuth films with control of their imperfection by atomic force microscopy / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov // Physics of the Solid State. – 2010. - № 6 (52). – P. 1298–1302. (Scopus) (0.25 п.л./0,1875 п.л.).

30. Демидов, Е. В. Явление переноса в монокристаллических пленках висмута / В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Демидов, М. М. Климантов // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена. Серия: Естественные и точные науки – 2010. - № 122. – С. 22-31. (0,625 п.л./0,375 п.л.).

31. Демидов, Е. В. Особенности структуры пленок висмута, полученных методом термического испарения в вакууме / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, М. М. Климантов, Д. Ю. Матвеев, С. В. Слепнев, Е. В. Усынин, Е. Е. Христинич, Е. В. Константинов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Серия: Естественные и точные науки. - 2009. № 95. – С. 105-120. (1 п.л./0,625 п.л.).

32. Демидов, Е. В. Атомно-силовая микроскопия декорированных оксидированием дефектов пленок висмута / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, М. М. Климантов // Физика твердого тела. – 2009. - № 4 (51). - С. 800-802. Переводная версия: Atomic-Force Microscopy of Bismuth Film Defects Decorated by Oxidation / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov, M. M. Klimantov // Physics of the Solid State. – 2009. - № 4 (51). – P. 846–848. (Scopus) (0,1875 п.л./0,125 п.л.).

33. Демидов, Е. В. Атомно-силовая микроскопия пленок висмута / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров // Физика твердого тела. – 2008. - Том 50, № 7. - С. 1312-1316. Переводная версия: Atomic-Force Microscopy of Bismuth Films / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov // Physics of the Solid State. – 2008. - № 7 (50). – P. 1365–1369. (Scopus) (0,3125 п.л./0,25 п.л.).

34. Демидов, Е. В. Кинетические явления и структура пленок висмута / В. А. Комаров, М. М. Климантов, М. М. Логунцова, С. Н. Пылина,

**Е. В. Демидов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. Серия: Естественные и точные науки. – 2006. - № 6 (15). – С. 131 –143. (0,1875 п.л./0,0625 п.л.).**

*Патенты:*

35. Пат. № 2452934 Российская Федерация, МПК G 01 Q 60/26. Способ препарирования тонких пленок висмута на слюде для выявления границ блоков методом атомно-силовой микроскопии / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров; заявитель и патентообладатель РГПУ им. А. И. Герцена. - № 2010126883/05; заявл. 30.06.10; опубл. 10.06.12. (0,375 п.л./0,25 п.л.).

36. Пат. № 2474005 Российская Федерация, МПК В 82 В 3/00. Способ создания мелкоблочных пленок с совершенной структурой блоков / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров; заявитель и патентообладатель РГПУ им. А. И. Герцена. - № 2011121598/28; заявл. 27.05.11; опубл. 27.01.13. (0,25 п.л./0,1875 п.л.).

37. Пат. № 2507317 Российская Федерация, МПК Н 01 L 35/34. Способ создания на подложках монокристаллических пленок твердого раствора висмут-сурьма / В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Демидов, Н. С. Каблукова; заявитель и патентообладатель РГПУ им. А. И. Герцена. - № 2012128190/05; заявл. 03.07.12; опубл. 20.02.14. (0,25 п.л./0,125 п.л.).

38. Пат. № 2523757 Российская Федерация, МПК G 01 N 23/223. Способ изготовления эталонов для рентгенофлуоресцентного анализа состава тонких пленок малокомпонентных твердых растворов и сплавов / В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Демидов, Д. Маркушевс; заявитель и патентообладатель РГПУ им. А. И. Герцена. - № 2013108511/28; заявл. 26.02.2013; опубл. 28.05.14 г. (0,25 п.л./0,125 п.л.).

*Публикации в других изданиях:*

39. Demidov E. V. Extrema positions of charge carrier band spectrum in thin bismuth films / Demidov E. V. // Physics of Complex Systems. – 2022. – № 4 (3). – P. 154-158. (0,312 п.л.).

40. Demidov E. V. Topological insulator's state in bismuth thin films / E. Demidov, V. Gerega, V. Grabov, V. Komarov, A. Suslov // AIP Conference Proceedings. – 2020. - № 2308. - P. 050007. (Scopus) (0,188 п.л./0,062 п.л.).

41. Demidov E. V. Thermoelectric properties of thin films of bismuth and bismuth-antimony solid solution / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov, A. V. Suslov, V. A. Gerega, D. D. Yefimov // Journal of Thermoelectricity. – 2020. – No 2 (2020). – P. 73-88. (1 п.л./0,25 п.л.).

42. Demidov E. V. Methods of experimental studying the galvanomagnetic properties of thin semimetals films under conditions of plane stretch / A. V. Suslov, V. M. Grabov, V. A. Komarov, E. V. Demidov, S. V. Senkevich, M. V. Suslov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. - №. 1281. – P. 012084. (Scopus) (0,25 п.л./0,062 п.л.).

43. Demidov E. V. Structure features of bismuth films doped with tellurium / D. Yu. Matveev, D. V. Starov, E. V. Demidov // J. Nano- Electron. Phys. – 2018. - № 2 (10). – P. 02047. (Scopus) (0,188 п.л./0,062 п.л.).

44. Демидов, Е.В. Состояние топологического изолятора в узкозонных полупроводниках с сильным спин-орбитальным взаимодействием / Е. В. Демидов, В. М. Грабов, В. А. Комаров, Н. С. Каблукова, А. Н. Крушельницкий // Физика диэлектриков (Диэлектрики — 2017): Материалы XIV Международной конференции, Санкт-Петербург, 29 мая-02 июня 2017 г. Т. 1. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2017. – С. 207-208. (0,125 п.л./0,031 п.л.).
45. Демидов, Е.В. Метод измерения термоэдс тонких пленок полуметаллов и узкозонных полупроводников, сформированных на тонких подложках / Е. В. Демидов, В. М. Грабов, В. А. Комаров, А. В. Суслов, М. В. Суслов // Пленки и покрытия – 2017: Труды 13-й Международной конференции, Санкт-Петербург, 18 – 20 апреля 2017 г. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2017. – С. 130-133. (0,25 п.л./0,062 п.л.).
46. Demidov E. V. The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates / E. V. Demidov, V. M. Grabov, V. A. Komarov, A. V. Suslov, M. V. Suslov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. - № 857. – P. 012006. (Scopus) (0,25 п.л./0,062 п.л.).
47. Демидов Е.В. Кристаллографическое картирование тонких пленок висмута на различных подложках методом дифракции отраженных электронов в РЭМ / М. В. Старицын, А. Н. Крушельницкий, Е. К. Иванова, В. П. Пронин, Е. В. Демидов // Труды 12-й международной конференции «Пленки и покрытия – 2015», Санкт-Петербург, 19 – 22 мая 2015 г. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 135-138. (0,25 п.л./0,062 п.л.).
48. Демидов Е.В. Методика получения и структура монокристаллических пленок твердого раствора висмут-сурьма / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Н. С. Каблукова, А. Н. Крушельницкий, Д. С. Маркушев // Термоэлектрики и их применения - 2014: Доклады Межгосударственной Конференции “Термоэлектрики и их применения - 2014” , Санкт-Петербург, 18-19 ноября 2014 г. – СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2014. – С. 138-143. (0,375 п.л./0,125 п.л.).
49. Демидов Е.В. Наблюдение магнитного квантования в монокристаллических пленках системы висмут-сурьма / Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Н. С. Каблукова, А. Н. Крушельницкий, О. А. Шварц // Термоэлектрики и их применения - 2014: Доклады Межгосударственной Конференции “Термоэлектрики и их применения - 2014” , Санкт-Петербург, 18-19 ноября 2014 г. – СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2014. – С. 150-154. (0,312 п.л./0,125 п.л.).
50. Demidov E. V. Quantum size effect in semimetal bismuth antimony wires and films / A. Nikolaeva, L. Konopko, V. Grabov, E. Demidov, N. Kablukova, V. Komarov, I Popov // 8th International Conference on Microelectronics and Computer Science, Chisinau, Republic of Moldova, October 22-25, 2014. – P. 82-85. (0,25 п.л./0,062 п.л.).

51. Демидов Е.В. Метод создания тонкопленочных эталонов состава для рентгенофлуоресцентного анализа тонких пленок малокомпонентных сплавов / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Д. Маркушев // Сборник докладов 11-й международной конференции «Пленки и покрытия – 2013», Санкт-Петербург, 6 – 8 мая 2013 г. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – С. 197-199. (0,188 п.л./0,016 п.л.).
52. Демидов Е.В. Явления переноса в нитях висмута полученных с применением электронно-лучевой литографии / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Е. В. Константинов // Физические явления в конденсированном состоянии вещества: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 18-19 июня 2013 г. – С. 21-26. (0,375 п.л./0,094 п.л.).
53. Демидов Е.В. Явления переноса в мелкоблочных пленках висмута с совершенной структурой блоков / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Н. И. Киселева // Физические явления в конденсированном состоянии вещества: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 18-19 июня 2013 г. – С.15-20. (0,375 п.л./0,094 п.л.).
54. Демидов Е.В. Структура и явления переноса в пленках висмута, имеющих нанокластерную структуру / Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Н. И. Киселева // Термоэлектрики и их применения: Доклады XIII Межгосударственного семинара, Санкт-Петербург, 13-14 ноября 2012 г. – СПб: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2012. – С. 364-368. (0,312 п.л./0,125 п.л.).
55. Демидов Е.В. Методы получения, структура и свойства нитей висмута и сплавов висмут-сурьма / В. М. Грабов, А. А. Николаева, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Е. В. Константинов, Г. И. Пара // Термоэлектрики и их применения: Доклады XIII Межгосударственного семинара, Санкт-Петербург, 13-14 ноября 2012 г. – СПб: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2012. – С. 67-72. (0,375 п.л./0,062 п.л.).
56. Demidov E. V. The occurrence of the classic size effect in single crystal bismuth films / V. M. Grabov, V. A. Komarov, E. V. Demidov, E. E. Khristich // Moldavian Journal of the Physical Sciences. - 2011. - №1 (10). – P. 87-95. (0,562 п.л./0,156 п.л.).
57. Демидов Е.В. Термоэлектрические свойства пленок висмута, имеющих наноблочную структуру / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Н. И. Киселева // Термоэлектричество. – 2011. - № 4. – С. 73-79. Переводная версия: Thermoelectric properties of bismuth films with a nanoblock structure / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov, N. I. Kiseleva // Journal of Thermoelectricity. – 2011. - № 4. – С. 69-74. (0,438 п.л./0,125 п.л.).
58. Демидов Е.В. Моделирование процесса формирования и роста островков висмута на подложке из слюды / В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Усынин, Е. В. Демидов // Термоэлектрики и их применения: Доклады XII Межгосударственного семинара, Санкт-Петербург, 23-24 ноября 2010 г. – СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2010. – С. 338-343. (0,375 п.л./0,094 п.л.).

59. Демидов Е. В. Выращивание мелкоблочных пленок висмута для увеличения их термоэлектрической эффективности / Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Е. В. Константинов // Термоэлектрики и их применения: Доклады XII Межгосударственного семинара, Санкт-Петербург, 23-24 ноября 2010 г. – СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2010. – С. 344-349. (0,375 п.л./0,125 п.л.).
60. Демидов Е.В. Структура и явления переноса в пленках системы висмут-сурьма / В. А. Комаров, Е. В. Демидов, Е. Е. Христинич, А. Н. Чичев // Термоэлектрики и их применения: Доклады XII Межгосударственного семинара, Санкт-Петербург, 23-24 ноября 2010 г. – СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2010. – С. 356-361. (0,375 п.л./0,094 п.л.).
61. Демидов Е.В. Влияние стратегии выбора направления диффузии на формирование зародышей при моделировании процесса роста тонких пленок висмута методом Монте-Карло / В. А. Комаров, Е. В. Усынин, Е. В. Демидов // Неравновесные процессы в природе: материалы Всероссийской научно - практической конференции, Елец, 30 ноября 2009 г. – Елец: Изд-во ЕГУ им. И.А. Бунина, 2010. – С. 38-41. (0,312 п.л./0,125 п.л.).
62. Демидов Е. В. Изучение процесса отжига пленок висмута / Е. В. Демидов, Е. В. Константинов // Физический вестник. – 2010. - №4. – С. 37 - 40. (0,25 п.л./0,125 п.л.).
63. Демидов Е.В. Атомно-силовая микроскопия поверхности кристаллов и пленок висмута / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров // Термоэлектричество. – 2009. - №1. - С. 42-47. Переводная версия: Atomic-force microscopy of the surface of crystals and bismuth films / V. M. Grabov, E. V. Demidov, V. A. Komarov // Journal of Thermoelectricity. – 2009. - № 1. – P. 41-46. (0,375 п.л./0,125 п.л.).
64. Демидов Е.В. Сканирующая зондовая микроскопия поверхности кристаллов и пленок висмута / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, М. М. Климантов // Физические явления в конденсированном состоянии вещества. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 22-24 июня 2009 г. – Чита: Изд-во Забайкальский государственный гуманитарно-педагогический университет, 2009. – С.17-23. (0,438 п.л./0,125 п.л.).
65. Демидов Е.В. Размерный эффект явлений переноса в монокристаллических пленках висмута / В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Демидов, М. М. Климантов // Физические явления в конденсированном состоянии вещества. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 22-24 июня 2009 г. – Чита: Изд-во Забайкальский государственный гуманитарно-педагогический университет, 2009. – С. 23-28. (0,375 п.л./0,094 п.л.).
66. Демидов Е.В. Моделирование процесса коалесценции пленок висмута на подложке из слюды / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, Е. В. Усынин // Термоэлектрики и их применения: Доклады XI Межгосударственного

семинара, Санкт-Петербург, 25-26 ноября 2008 г. – СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2008. – С. 316-321. (0,375 п.л./0,094 п.л.).

67. Демидов Е.В. Исследование структуры и дефектов пленок висмута методом атомно-силовой микроскопии / В. А. Комаров, Е. В. Демидов, М. М. Климантов // Термоэлектрики и их применения: Доклады XI Межгосударственного семинара, Санкт-Петербург, 25-26 ноября 2008 г. – СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2008. – С. 322-326. (0,312 п.л./0,125 п.л.).

68. Демидов Е.В. Явления переноса и структура поверхности пленок висмута / В. А. Комаров, Е. В. Демидов, М. М. Климантов, С. Н. Пылина, М. М. Логунцова // Термоэлектрики и их применения: Доклады X Межгосударственного семинара, Санкт-Петербург, ноябрь 2006 г. – СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2006. – С. 114 -119. (0,375 п.л./0,094 п.л.).

### Список цитируемой литературы:

1. Transport properties of Bi-RICH Bi-Sb alloys / B. Lenoir, M. Cassart, J.-P. Michenaud, H. Scherrer, S. Scherrer // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1996. - № 57. – P. 89.

2. Structural, Electronic, and Thermoelectric Properties of BiSb Nanotubes / H. Y. Lu, H. J. Liu, L. Pan, Y. W. Wen, X. J. Tan, J. Shi, X. F. Tang // The Journal of Physical Chemistry C. – 2010. - № 114 (49). – P. 21234.

3. Effect of spin-orbit coupling on the elastic, mechanical, and thermodynamic properties of Bi-Sb binaries / S. Singh, I. Valencia-Jaime, O. Pavlic, A. H. Romero // Physical Review B. – 2018. - № 97. – P. 054108.

4. Role of Quantum and Surface-State Effects in the Bulk Fermi-Level Position of Ultrathin Bi Films / T. Hirahara, T. Shirai, T. Hajiri, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, S. Hasegawa, K. Kobayashi // Physical Review Letters. – 2015. - № 10 (115) – P. 106803.

5. О наблюдении квантовых размерных эффектов в пленках Bi / Ю. Ф. Огрин, В. Н. Луцкий, М. И. Елинеон // Письма в ЖЭТФ. – 1966. - № 3 (3). – С. 114.

6. Простой контрпример для  $Z_2$ -классификации топологических изоляторов, основанной на соответствии объем–граница / С. Н. Молотков, М. И. Рыжкин // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2015. - № 3 (102). – С. 216-224.

7. Majorana Kramers Pairs in Higher-Order Topological Insulators / C.-H. Hsu, P. Stano, J. Klinovaja, D. Loss // Physical Review Letters. – 2018. - № 121. – P. 196801.

8. A topological Dirac insulator in a quantum spin Hall phase / D. Hsieh, D. Qian, L. Wray, Y. Xia, Y. S. Hor, R. J. Cava, M. Z. Hasan // Nature. – 2008. - № 452. – P. 970-974.

9. Experimental Realization of a Three-Dimensional Topological Insulator,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  / Y. L. Chen, J. G. Analytis, J. H. Chu, Z. K. Liu, S. K. Mo, X. L. Qi, H. J. Zhang, D. H. Lu, X. Dai, Z. Fang, S. C. Zhang, I. R. Fisher, Z. Hussain, Z. X. Shen // Science. – 2009. - № 325 (5937). – P. 178-181.

10. Observation of Time-Reversal-Protected Single-Dirac-Cone Topological-Insulator States in  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  / D. Hsieh, Y. Xia, D. Qian, L. Wray, F. Meier, J. H. Dil, J. Osterwalder, L. Patthey, A.V. Fedorov, H. Lin, A. Bansil, D. Grauer, Y. S. Hor, R. J. Cava, M. Z. Hasan // *Physical Review Letters*. – 2009. - № 103. – P. 146401.
11. Topological insulators in  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  with a single Dirac cone on the surface / H. Zhang, Ch.-X. Liu, X.-L. Qi, X. Dai, Zh. Fang, Sh.-Ch. Zhang // *Nature Physics*. – 2009. - № 5. – P. 438-442.
12. Observation of a large-gap topological-insulator class with a single Dirac cone on the surface / Y. Xia, D. Qian, D. Hsieh, L. Wray, A. Pal, H. Lin, A. Bansil, D. Grauer, Y.S. Hor, R.J. Cava, M. Z. Hasan // *Nature Physics*. – 2009. - № 5. – P. 398-402.
13. Луцкий В. Н. Об особенностях оптического поглощения металлических пленок в области превращения металла в диэлектрик / Луцкий В. Н. // *Письма в ЖЭТФ*. – 1965. - № 2 (8) – С. 391.
14. Sandomirskii V. B. Quantum Size Effect in a Semimetal Film / Sandomirskii V. B. // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1967. - № 1 (52). – P. 158.
15. Theoretical investigation of thermoelectric transport properties of cylindrical Bi nanowires / Y.-M. Lin, X. Sun, M. S. Dresselhaus // *Physical Review B*. – 2000. - № 62. – P. 4610.
16. Hofmann P. The surfaces of bismuth: Structural and electronic properties / Hofmann P. // *Progress in Surface Science*. – 2006. - № 5 (81). – P. 191-245.
17. Duggal V. P. Thickness-Dependent Oscillatory Behavior of Resistivity and Hall Coefficient in Thin Single-Crystal Bismuth Films / V. P. Duggal, R. Rup // *Journal of Applied Physics*. – 1969. - № 40. – P. 492-495.
18. Semimetal-to-semiconductor transition in bismuth thin films / C. A. Hoffman, J. R. Meyer, F. J. Bartoli, A. Di Venere, X. J. Yi, C. L. Hou, H. C. Wang, J. B. Ketterson, G. K. Wong // *Physical Review B*. – 1993. - № 48. – P. 11431.
19. Features of Temperature Dependence of the Resistance of Thin Bismuth Films / Yu. F. Komnik, E. I. Bukhshtab, Yu. V. Nikitin, V. V. Andrievskii // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1971. - № 2 (33). – P. 364.
20. Грабов В. М. Энергетический спектр и механизмы релаксации носителей заряда в легированных кристаллах висмута, сурьмы и сплавов висмут-сурьма: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: специальность: 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков: защищена 1998. / Грабов В. М.; РГПУ им. А. И. Герцена. – Санкт-Петербург, 1998. – 603 с.
21. Экспериментальные исследования тепловых свойств тонких пленок зондовым методом периодического нагрева / С. Т. Давитадзе, С. Н. Кравчун, Б. А. Струков, Б. М. Гольцман, В. В. Леманов, С. Г. Шульман // *Физика твердого тела*. – 1997. № 7 (39). – С. 1299.
22. Комаров В.А. Исследование кинетических свойств пленок висмута на различных подложках: диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук: специальность: 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков: защищена 1989. / Комаров В. А.; ЛГПИ им. А. И. Герцена; научный руководитель Грабов В. М. – Санкт-Петербург, 1989. - 117 с.

23. Ограничение подвижности носителей заряда в пленках висмута, обусловленное их блочной структурой / В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2011. - №2. – С. 81-85.

24. Кинетические явления и структура пленок висмута / В. А. Комаров, М. М. Климантов, М. М. Логунцова, С. Н. Пылина, Е. В. Демидов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2006. - № 6 (15). – С. 131–143.

25. The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates / E. V. Demidov, V. M. Grabov, V. A. Komarov, A. V. Suslov, M. V. Suslov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. - № 857. – P. 012006.

26. Грабов В. М. Физика полуметаллов и низкоразмерных структур на их основе: учебное пособие / В. М. Грабов, В. А. Комаров, И. И. Худякова, Т. А. Яковлева; редактор В. М. Грабов – Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2011. – 293 с.

27. Особенности магнетосопротивления тонких пленок висмута в области проявления квантовых поправок / Е. И. Бухштаб, Ю. Ф. Комник, А. В. Бутенко, В. В. Андриевский // Физика низких температур. – 1982. - № 4 (8). – С. 440-445.

28. Локализационные эффекты в пленках висмута в слабом магнитном поле / Ю. Ф. Комник, Е. И. Бухштаб, А. В. Бутенко, В. В. Андриевский // Физика низких температур. – 1982. - № 12 (8). – С. 1289 -1293.

29. Проявление спин-орбитального взаимодействия в пленках висмута в параллельном магнитном поле / Ю. Ф. Комник, В. В. Андриевский, И. Б. Беркутов // Физика низких температур. – 2007. - № 1 (33). - С. 105–114.

30. Спин-орбитальное взаимодействие в пленках висмута малой толщины / Ю. Ф. Комник, И. Б. Беркутов, В. В. Андриевский // Физика низких температур. – 2005. - № 3-4 (31). - С. 429-435.

31. Bogod Yu. A. Peculiarities of the magnetoresistance in Bi in high transverse and longitudinal magnetic fields / Yu. A. Bogod, V. V. Eremenko // Basic Solid State Physics. – 1967. - № 2 (21). - P. 797-803.

32. Bogod Yu. A. On the resistance of Bi in high magnetic fields / Yu. A. Bogod // Basic Solid State Physics. – 1967. - № 1 (24). – P. K49-K51.

33. Иванов Г. А. Физические свойства полуметаллов типа висмута / Г. А. Иванов, В. М. Грабов // Физика и техника полупроводников. – 1995. - № 5 (29). – P. 1040.

34. Общая закономерность, определяющая величину, температурную и концентрационную зависимость удельного сопротивления кристаллов типа висмута / В. М. Грабов, А. С. Парахин, Л. С. Багулин, О. Н. Урюпин // Известия

Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2006. - № 6 (15). – С. 86.

35. Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута и сплавов висмут-сурьма на подложках с различным температурным расширением / В. М. Грабов, В. А. Комаров, Н. С. Каблукова // Физика твердого тела. – 2016. - 3 (58). – С. 605-611.

36. Комник Ю. Ф. Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты / Комник Ю. Ф. – Москва: Атомиздат, 1979. – 264 с.

37. Луцкий В. Н. Об особенностях оптического поглощения металлических пленок в области превращения металла в диэлектрик / Луцкий В. Н. // Письма в ЖЭТФ. – 1965. - № 8 (2). – С. 391.

38. Сандомирский В.Б. Квантовый размерный эффект в полуметаллах / Сандомирский В.Б. // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 1967. - № 1 (52). – С. 158.

39. Theoretical investigation of thermoelectric transport properties of cylindrical Bi nanowires / Y.-M. Lin, X. Sun, M. S. Dresselhaus // Physical Review B. – 2000. - № 7 (62). – P. 4610.

40. Quantum well states in ultrathin Bi films: Angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculations study / T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, S. Hasegawa // Physical Review B. – 2007. - № 3 (75). – P. 035422.

41. Role of spin-orbit coupling and hybridization effects in the electronic structure of ultrathin Bi films / T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, M. Saito, S. Hasegawa // Physical review letters. – 2006. - № 14 (97). – P. 146803.

42. Low-temperature electrical-transport properties of single-crystal bismuth films under pressure / Mei Lu, R. J. Zieve, A. van Hulst, H. M. Jaeger, T. F. Rosenbaum, S. Radelaar // Physical Review B. – 1996. - № 3 (53). – P. 1609–1615.

43. Semimetal-to-Semiconductor Transition in Bismuth Thin-Films / C. A. Hoffman, J. R. Meyer, F. J. Bartoli, A. Di Venere, X. J. Yi, C. L. Hou, H. C. Wang, J. V. Ketterson, G. K. Wong // Physical Review B. – 1993. - № 15 (48). – P. 11431–11434.

44. Квантовые размерные эффекты в тонких пленках висмута / Ю. Ф. Огрин, В. Н. Луцкий, Р. М. Шефталъ, М. У. Арифова, М. И. Елинсон // Радиотехника и электроника. – 1967. - № 12 (4). – С. 748-749.

45. Galvanomagnetic Studies of Bismuth Films in the Quantum-Size-Effect Region / N. Garcia, Y. Kao, M. Strongin // Physical Review B. – 1972. - № 6 (5). – P. 2029–2039.

46. Фесенко Е. П. Особенности квантового размерного эффекта сопротивления в пленках висмута / Фесенко Е. П. // Физика твердого тела. – 1969. – Том 11. – С. 2647.

47. Молин В. Н. Электрофизические свойства размерно-квантованных пленок висмута и антимонида индия, полученных в условиях быстрой конденсации: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук: специальность: 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков: защищена 1973. / Молин В. Н.; Академия Наук СССР. Сибирское отделение. – Новосибирск, 1973. - 165 с.

48. Demidov E. V. Extrema positions of charge carrier band spectrum in thin bismuth films / Demidov E. V. // *Physics of Complex Systems*. – 2022. – № 4 (3). – P. 154-158.