

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента, доктора физико-математических наук,  
профессора кафедры физики Института водного транспорта ФГБОУ ВО  
«ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»**

**Полищука Владимира Анатольевича**

**на диссертацию Демидова Евгения Владимировича «Электронные явления переноса в условиях квантового и классического размерных эффектов в тонких пленках висмута», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 1.3.8 Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)**

### **Актуальность темы**

В настоящее время кристаллы и низкоразмерные объекты висмута и его сплавов вызывают теоретический и практический интерес у исследователей, что связано с особенностями электронного энергетического спектра данного класса материалов и нетривиальной топологией зонной структуры ряда его представителей, а также возможным практическим применением в термоэлектричестве. Висмут имеет низкую плотность электронных состояний на уровне Ферми, определяемую малым непрямым перекрытием около 40 мэВ между валентной зоной в точке T и зоной проводимости в точке L зоны Бриллюэна. Прямая запрещенная зона расположена в точке L зоны Бриллюэна, ее значение еще меньше и составляет около 10 мэВ. Эти особенности делают материал интересным для изучения, но, с другой стороны, определяют сложности описания и интерпретации его свойства, так как малые воздействия на кристаллическую и электронную структуру могут приводить к существенным изменениям электрических и гальваномагнитных свойств. Корректная интерпретация изменения электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств в тонких пленках висмута требует комплексного исследования данных свойств с одновременным контролем кристаллографической ориентации, размеров кристаллитов, толщины плёнок и рассмотрение одновременного влияния ряда эффектов, таких, как классический размерный эффект, влияние механических напряжений, границ кристаллитов и поверхности, ряда когерентных явлений, в том числе квантовый размерный эффект, эффект слабой локализации. Поэтому тематику работы следует признать весьма актуальной.

## **Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна**

1. Установлен ряд новых закономерностей изменения электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонких плёнок висмута толщиной от 10 нм до нескольких микрометров.

2. Количественно определён вклад поверхности, вклад границ кристаллитов и хиллоков в рассеяние носителей заряда в плёнках висмута, а также их вклад в дополнительную концентрацию носителей заряда в данных объектах по отношению к массивному висмуту.

3. Установлено, что причины отклонений экспериментальных проявлений квантового размерного эффекта в тонких пленках висмута от его теоретического описания связанные с различным периодом размерных осцилляций, наблюдаемых в различных работах, различным интервалом толщин в которых наблюдаются данные осцилляции, а также отсутствием экспериментально наблюдаемого в явлениях переноса перехода полуметалл-полупроводник заключаются в неучете ограничения длины свободного пробега электронов границами кристаллитов и хиллоков и изменения концентрации носителей заряда в тонких плёнках висмута, обусловленного влиянием поверхности, границ кристаллитов и хиллоков, а также изменением зонной структуры вследствие внутренних механических напряжений в тонкой плёнке связанными с несоответствием температурного расширения материала плёнки и подложки.

4. Установлено, что рост концентрации носителей заряда при уменьшении толщины плёнок висмута для толщин меньше 25 нм происходит для дырок с большей скоростью, чем для электронов.

Полученные результаты стали возможны благодаря разработанным в ходе исследования способам контроля структуры тонких плёнок и анализа экспериментальных результатов:

– способ измерения размеров кристаллитов и толщины блочных плёнок висмута методом атомно-силовой микроскопии с применением избирательного химического травления;

– методика расчёта подвижности и концентрации носителей заряда в тонких плёнках висмута с использованием выражений для коэффициентов переноса в случае квадратичного закона дисперсии и экспериментальных значений удельного сопротивления, магнетосопротивления, коэффициента Холла и термоэдс, а также рядом экспериментально проверенных приближений.

– исследование явлений переноса (проводимость, магнетосопротивление, эффект Холла, термоэдс), которое ведётся в широком интервале температур 5 – 300 К и магнитных полей 0 – 8 Тл с тщательным контролем структуры и состава исследуемых образцов.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современного научного оборудования, анализом погрешностей измерений, обоснованным применением используемых в работе приближений для расчёта подвижности и концентрации носителей заряда. Детальное рассмотрение используемых методов получения тонкопленочных образцов, анализа их структуры и измерения электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств позволяет понять особенности получения экспериментальных результатов и их анализа.

В работе важное место занимают вопросы, связанные с технологией получения тонких плёнок, контролем и управлением их структурой. Все эти вопросы подробно исследованы автором и позволяет ему получать тонкие плёнки на основе висмута с заданной структурой и составом.

Большой набор полученных и обработанных экспериментальных данных, ряд специально поставленных экспериментов, согласованность полученных экспериментальных результатов с другими исследованиями, в части, где такие сравнения возможны, проведение расчётов, основанных на использовании современной теории полуметаллов и узкозонных полупроводников, а также физики низкоразмерных систем позволяют говорить об обоснованности положений, выводов и рекомендаций диссертации.

## **Значимость для науки и практики полученных автором результатов и выводов**

Установленные автором закономерности электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических явлений в тонких плёнках висмута и причины различного проявления осцилляций электрических и гальваномагнитных свойств в рамках квантового размерного эффекта представляют собой существенный вклад в развитие физики низкоразмерных структур на основе полуметаллов и узкозонных полупроводников.

Полученные экспериментальные данные и их анализ расширяют теоретические представления о влиянии классического и квантового размерных эффектов на особенности явлений переноса в полуметаллах.

Установленный вклад поверхности и границ кристаллитов в рост концентрации носителей заряда в плёнках висмута при уменьшении их толщины и влиянии этого вклада на проявление квантового размерного эффекта в явлениях переноса стимулирует дальнейшие исследования природы электронных состояний в полуметаллах, обусловленных свободной поверхностью и дефектами кристаллической структуры.

В части практической значимости результатов следует выделить предложенный метод контроля ограничения подвижности электронов и дырок поверхностью и границами кристаллитов с целью модификации значения термоэдс плёнок висмута и твёрдого раствора висмут-сурьма, который может быть использован для увеличения термоэлектрической эффективности указанных материалов и создании р-ветви термоэлектрических преобразователей энергии в области низких температур.

#### **Замечания по диссертации**

1. Для определения размеров кристаллитов тонких плёнок в работе преимущественно использовалась атомно-силовая микроскопия, однако отдельные исследования их структуры проводились методом дифракции обратно рассеянных электронов в сканирующем электронном микроскопе. Данный метод также может применяться для определения размеров кристаллитов в тонких плёнках.

2. Для оценки изменения концентрации носителей заряда в легированных монокристаллах висмута возможно использование спектров плазменного отражения электромагнитного излучения в дальней ИК области. Применение данного метода для исследования тонких плёнок висмута позволило бы получить дополнительную информацию в рамках данной работы.

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления от данной диссертационной работы и не уменьшают её научную и практическую значимость.

#### **Об оформлении диссертации**

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций, состоит из введения, 5 глав, заключения, содержит 270 страниц, 120 рисунков, 6 таблиц, 308 наименований списка цитируемой литературы.

Материалы диссертации достаточно подробно отражены в 37 публикациях, удовлетворяющих требованиям ВАК, из них 4 патента РФ. Материалы диссертации также отражены в докладах на научных конференциях различного уровня.

Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает её содержание.

#### **Общие выводы**

Диссертация Демидова Евгения Владимировича «Электронные явления переноса в условиях квантового и классического размерных эффектов в тонких плёнках висмута» представляет собой систематическое исследование способов получения, структуры, явлений переноса в тонких плёнках висмута,

проявления в них ряда когерентных эффектов, а также влияния материалов подложек, поверхности, границ кристаллитов и хиллоков на их свойства.

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой разработаны теоретические положения о закономерностях электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонких плёнок полуметалла висмута, совокупность которых можно квалифицировать как существенное научное достижение в области физики низкоразмерных структур на основе полуметаллов и узкозонных полупроводников. Диссертация соответствует критериям пп. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней (утв. Постановлением Правительства № 842 от 24.09.2013 г. в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор Демидов Евгений Владимирович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, доцент, профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О.Макарова»

«28» 03 2025



Владимир Анатольевич Полищук

Я, Полищук Владимир Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации и оформления аттестационного дела Е.В.Демидова \_\_\_\_\_ В.А. Полищук

Контактные данные: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
Адрес: 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7;  
Тел.: +7 (812) 748-97-69 E-mail: [vpvova@rambler.ru](mailto:vpvova@rambler.ru)  
web-сайт: <https://gumrf.ru/>

