



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет**

**«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»**

**(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной и  
инновационной деятельности  
федерального государственного  
автономного образовательного  
учреждения высшего образования  
Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И.  
Ульянова (Ленина), д.т.н.

**А.А. Семенов**

“ 26 ”

2025 г.

## **О Т З Ы В**

ведущей организации федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.

Ульянова (Ленина) 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 специальности

**1.3.8. Физика конденсированного состояния**

Современное развитие технологий связано с постоянным стремлением к уменьшению размеров устройств. Низкоразмерные и наноразмерные системы занимают все более важное место в науке и технике. Для наносистем, при уменьшении их размеров, все большее значение приобретают когерентные явления. Вследствие большой длины волны де-Бройля электронов, висмут является хорошим модельным материалом для исследования особенностей электронных свойств низкоразмерных систем, обусловленных когерентными явлениями. Поэтому, исследование электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств висмута

в тонкопленочном состоянии под влиянием квантового и классического размерных эффектов является важной задачей. Одним из первых когерентных явлений при движении электронов в конденсированных средах исследован квантовый размерный эффект в тонких пленках висмута.

**Актуальность темы диссертационного исследования** Е. В. Демидова прежде всего определяется тем обстоятельством, что несмотря на доказанную природу осцилляционных зависимостей электрических и гальваномагнитных свойств от толщины пленок висмута, связанную с проявлением квантового размерного эффекта, имеющиеся ряд экспериментальных результатов не имели общепризнанной интерпретации до настоящей работы. Учитывая высокую важность когерентных явлений для нанoeлектроники, проведенные Е. В. Демидовым комплексные исследования закономерностей проявления квантового размерного эффекта в электрических и гальваномагнитных свойствах тонких пленок висмута с учетом вкладов поверхности, границ кристаллитов и механических деформаций, оказывающих влияние на подвижность и концентрацию носителей заряда, представляются весьма актуальными.

**Структура диссертации.** Диссертация Демидова Е.В. состоит из введения, пяти основных глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, излагаются цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

**Первая глава представляет собой обзор литературы** по тематике исследования, включая рассмотрение особенностей физических свойств кристаллов типа висмута, зонной структуры и энергетического спектра электронов. Рассматриваются явления переноса в кристаллах типа висмута. Обсуждаются современные достижения в области исследования классического и квантового размерных эффектов в пленках висмута. Также выделены проблемы, остающиеся дискуссионными к настоящему времени, включая интерпретацию квантового размерного эффекта в пленках висмута.

**Вторая глава посвящена методам получения и исследования состава, морфологии и структуры тонких пленок системы «висмут-сурьма».** Рассмотрены возможности и недостатки различных технологических подходов, обсуждаются возможности улучшения структуры пленок. Приведены сведения о технологических режимах получения исследуемых в работе пленок методом термического испарения в вакууме и условиях их легирования и зонной перекристаллизации. Детально рассмотрено влияние указанных режимов на структуру и морфологию пленок. Приведены сведения о предложенных методиках на основе атомно-силовой микроскопии в комбинации с селективным химическим травлением и декорированием для выявления микроструктуры тонких пленок висмута.

**В третьей главе** приведены экспериментальные результаты исследования гальваномагнитных и термоэлектрических свойства пленок чистого и легированного висмута с блочной и монокристаллической

структурами, в широком диапазоне толщин (от 10 нм до 1,2 мкм), а также тонких пленок системы «висмут-сурьма». Подробно обсуждаются характер температурных зависимостей удельного сопротивления, коэффициента Холла. Результаты обсуждаются с учетом микроструктуры пленок, рассеяния носителей заряда на границах кристаллитов, хиллоков.

**В четвертой главе** рассматриваются подходы к расчету подвижностей и концентраций носителей заряда в тонких пленках полуметаллов. Приведены результаты исследования и подробный анализ полученных экспериментальных зависимостей гальваномагнитных и термоэлектрических свойств исследуемых объектов. Обсуждаются вклады изменения толщины и микроструктуры пленок в изменения концентрации и подвижности свободных носителей заряда, их влияние на проявление классического и квантового размерных эффектов.

**В пятой главе** приведены результаты расчетов положения экстремумов валентной зоны и зоны проводимости для тонких пленок висмута. Обсуждаются факторы, влияющие на период осцилляций гальваномагнитных свойств.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций, изложена грамотным научно-техническим стилем, последовательно и логично.

**Автореферат диссертации** изложен на 47 страницах, содержит 24 рисунка, список публикаций автора по теме диссертации. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и дает полное представление о научной новизне, практической значимости, актуальности исследования, личному вкладу, достоверности и значимости научных результатов.

**Достоверность результатов и обоснованность выводов диссертации** обеспечивается применением комплекса современных методов получения и исследования структуры тонких пленок, апробированными методами исследования комплекса электрических, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств, обоснованным применением используемых в работе приближений для расчёта подвижности и концентрации носителей заряда, а также проверкой их правомерности в рамках специально поставленных экспериментов.

**Апробация работы и публикации.** Материалы диссертации широко доложены и обсуждались на более 20 Международных и Российских научных конференциях, форумах и симпозиумах. По теме работы соискателем опубликовано 68 научных печатных работ, включая 33 научные статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, а также 29 научных работ в зарубежных рецензируемых изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus, 1 монография. Новизна полученных в работе результатов защищена 4 патентами РФ.

Автор внес существенный вклад в развитие методов получения тонких пленок висмута и твердого раствора висмут-сурьма с заданной контролируемой концентрацией дефектов, методов контроля их структуры и состава, определения толщины тонких пленок, а также методов расчёта концентрации и подвижности носителей заряда на основе гальваномагнитных и термоэлектрических свойств.

Автором получен ряд **новых научных результатов** в области физики тонких пленок полуметаллов, к наиболее важным следует отнести:

- выявленные особенности проявления классического размерного эффекта в тонких пленках висмута, заключающиеся в большем ограничении поверхностью подвижности электронов по отношению к подвижности дырок и большим ограничением границами кристаллитов и хиллоков подвижности дырок по отношению к подвижности электронов;
- выявленные закономерности увеличения концентрации носителей заряда в тонких пленках висмута при уменьшении их толщины;
- выявленные закономерности изменения размеров кристаллитов при увеличении толщины тонких пленок висмута;
- корректная интерпретация наблюдаемых осцилляционных зависимостей электрических и гальваномагнитных свойств тонких пленках висмута, обусловленных квантовым размерным эффектом с учетом вышеуказанных закономерностей.

Значимым является и развитие методик на основе атомно-силовой микроскопии (АСМ) в комбинации с различными технологическими воздействиями, позволяющими расширить диагностические возможности метода АСМ для изучения блочной структуры тонких пленок и определения их толщины и выявления особенностей микроструктуры.

**Для практического применения важны** установленные автором оптимальные параметры метода термического испарения в вакууме для получения крупноблочных пленок висмута (111) с согласованной ориентацией соседних кристаллитов. Полученные результаты работы могут быть использованы при изготовлении низкоразмерных структур полуметаллов и узкозонных полупроводников с заданной концентрацией носителей заряда.

Полученные автором результаты и выводы могут быть использованы для дальнейшего развития физики явлений переноса в низкоразмерных и наноразмерных структурах полуметаллов и узкозонных полупроводников. Результаты представляют интерес для специалистов в области физики узкозонных полупроводников и полуметаллов, физики наноструктур, низкоразмерных структур, мезоскопических структур, физики термоэлектрического преобразования энергии в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, СПбГУ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбПУ, РГПУ им. А. И. Герцена и др.

Однако по диссертации можно сделать **ряд замечаний**:

1. В работе подробно рассматривается влияние микроструктуры исследуемых пленок на их гальваномагнитные и термоэлектрические

свойства, но из текста автореферата остается неясным оценивалась ли концентрация точечных дефектов в изучаемых пленках, какова она?

2. При расчете положения энергетических экстремумов зонного спектра носителей заряда в тонких пленках висмута законы дисперсии  $L$ -электронов и  $T$ -дырок аппроксимированы простой квадратичной моделью, но не обосновывается почему можно использовать данное приближение.

3. Получены интересные результаты по выявлению межкристаллитных границ комбинацией декорирования с последующим анализом данных методом атомно-силовой микроскопии, но в работе в качестве метода декорирования использован только метод оксидирования на воздухе, не используются другие методы.

4. В работе установлена определяющая роль поверхности в росте концентрации носителей заряда при уменьшении толщины тонких пленок висмута, что предполагает потенциальную возможность изменения этой роли с течением времени вследствие различных поверхностных процессов и явлений. Анализ этой ситуации был бы весьма интересен.

5. Исследование в тонких пленках висмута дополнительных электрофизических свойств, например, эффекта Нернста–Эттингсгаузена позволило бы получить дополнительную информацию для расчёта концентрации и подвижности носителей заряда.

В целом указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертации.

### **Заключение**

В целом диссертационная работа Евгения Владимировича Демидова на тему «Электронные явления переноса в условиях квантового и классического размерных эффектов в тонких пленках висмута» представляет собой законченное научное исследование структуры, электрических, гальваномагнитных, термоэлектрических свойств тонких пленок висмута, особенностей проявления в них квантового и классического размерных эффектов, а также влияния свойств подложек, поверхности, границ кристаллитов и хиллоков на их свойства.

Совокупность полученных результатов является существенным научным достижением в области физики тонких пленок полуметаллов, а установленная определяющая роль поверхности в росте концентрации носителей заряда пленок висмута при уменьшении их толщины стимулирует дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования природы электронных поверхностных состояний полуметаллов и узкозонных полупроводников.

По содержанию, актуальности и научной новизне, объёму проведённого исследования, значимости полученных результатов и выводов диссертация соответствует критериям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (утв. постановлением Правительства

Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) с изменениями и дополнениями, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Демидов Евгений Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв заслушан и принят на заседании кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) 06.03.2025 г. Научно-педагогический состав кафедры микро- и наноэлектроники – 49 чел., присутствовало на заседании 39 человек.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, доцентом, доцентом кафедры микро- и наноэлектроники Спивак Юлией Михайловной и утвержден на заседании кафедры 06.03.2025 г., протокол № 3.

Результаты голосования: «за» - 39 чел.,  
«против» - 0 чел.,  
«воздержались» - 0 чел.

Доктор технических наук, доцент, доцент  
кафедры микро-  
и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Спивак Юлия Михайловна  
e-mail: [ymspivak@etu.ru](mailto:ymspivak@etu.ru)

Заведующий кафедрой микро-  
и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,  
доктор физико-математических наук, доцент

Комков Олег Сергеевич  
e-mail: [oskomkov@etu.ru](mailto:oskomkov@etu.ru)

Ученый секретарь кафедры микро- и  
наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

Александрова Ольга  
Анатольевна  
[oaaleksandrova@etu.ru](mailto:oaaleksandrova@etu.ru)

Подписи Ю.М. Спивак, О.С. Комкова, О.А. Александровой заверяю:

Ученый секретарь

диссертационных советов СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Т.Л. Русяева

Сведения о ведущей организации:

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

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф.

<https://etu.ru/>

+7(812) 234-46-51

[info@etu.ru](mailto:info@etu.ru)

