

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
“ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
НАН БЕЛАРУСИ”

УДК 537.633:621.328

СОБОЛЬ

Валерий Романович

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА КРИОПРОВОДНИКОВ В УСЛОВИЯХ  
НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И АНИЗОТРОПИИ РАССЕЯНИЯ  
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

01.04.07 - физика конденсированного состояния

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Минск 2005

Работа выполнена в Государственном научном учреждении “Институт физики твердого тела и полупроводников Национальной академии наук Беларуси”

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Демьянов Сергей Евгеньевич  
ГНУ “Институт физики твердого тела и полупроводников  
НАН Беларуси”,  
отдел криогенных исследований

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Песчанский Валентин Григорьевич,  
Физико-технический институт низких температур НАН  
Украины, отдел квантовых кинетических явлений в  
проводящих системах

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Кузьмин Владимир Семенович,  
Минский государственный экологический университет им.  
А.Д.Сахарова, кафедра физики и высшей математики

доктор физико-математических наук,  
профессор Шепелевич Василий Григорьевич,  
Белорусский государственный университет,  
кафедра физики твердого тела

Опонирующая организация – Белорусский государственный педагогический университет им М.Танка

Защита состоится 30 сентября 2005 года в 14 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.06.01 в ГНУ “Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси”

(220072, г.Минск, ул.П.Бровки, 17, телефон ученого секретаря 284-27-91).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ “Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси”.

Автореферат разослан “ 15 ” августа 2005 года.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
доктор физ.-мат. наук



А.П.Сайко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В фундаментальных исследованиях сильное магнитное поле как метод определения топологии поверхностей Ферми металлов используется достаточно давно и позволяет при изучении гальвано- и термомагнитных явлений выявлять динамику заряженных частиц, абстрагируясь от диссипативных процессов. К 80-м годам изознергетические поверхности электронов проводимости большинства металлов были установлены, но при анализе результатов измерений исследователи столкнулись с обстоятельствами, затрудняющими их интерпретацию из-за ряда факторов, возмущающих движение электронов и видоизменяющих макроскопические характеристики. К таким факторам относится низкотемпературная анизотропия рассеяния электронов на фононах и дислокациях, неоднородность проводящих свойств, обусловленная характеристиками самого материала или воздействием внешнего магнитного поля, нелинейная динамика носителей заряда в собственном поле тока большой плотности, разогрев кристаллической решетки при дефиците мощности теплоотвода. Кроме того, в металлах с различным уровнем примесного рассеяния электронов проводимости были обнаружены магнитопробойные и другие квантовые явления – локализация носителей заряда, положительная магнитопроводимость, отрицательный температурный коэффициент сопротивления и др. В результате, исследования электронных свойств стали проводиться с учетом условий промежуточного магнитного поля, обуславливающих магнитоперебросную диффузию электронов, перераспределение (скинирование) постоянного тока, магнитодинамическую электрическую нелинейность, температурно-электрические доменные состояния, квантовую интерференцию электронных волн при большой длине фазовой когерентности.

Многообразие экспериментальных данных о низкотемпературных процессах переноса заряда в проводящих средах создало предпосылки для возникновения большого числа теоретических моделей, которые, тем не менее, не позволили однозначно описать наблюдаемые закономерности. Причинами такой ситуации, сложившейся ко времени начала данной работы, явились сложный характер механизмов рассеяния, возмущающих движение электронов, отсутствие комплексных исследований, а также консервативность криогенных экспериментальных методик. Ввиду этого существовавшие представления о кинетических явлениях в условиях неоднородности проводящих свойств, о нелинейной динамике носителей заряда в металлах и воздействии на нее тепловых процессов не позволяли разрешить всего многообразия стоявших перед исследователями вопросов электродинамики реальных проводящих сред.

С прикладной точки зрения актуальность изучения явлений низкотемпературного переноса заряда и тепла в металлах в сильных магнитных полях определяется важностью задач по созданию новых криоматериалов применительно к энергетике, метрологии, медицинской технике. Развитие криогенных технологий базируется на создании эффективных магнитных систем, работающих

при температуре жидкого гелия и выше. Так, для магнитных систем существует проблема оптимизации параметров токопроводящих обмоток, которые функционируют в условиях неоднородного магнитного поля, уменьшающегося от центра к области наружных слоев. Проводники таких обмоток обычно изготавливают из сверхпроводящих материалов или нормальных металлов. Эффективность их работы зависит от вида электронного спектра материала, степени дефектности проводника, характера распределения тока, условий отвода выделяемой джоулевой энергии. Решение перечисленных вопросов позволит с учетом реальных экстремальных условий эксплуатации разработать оптимальный вариант применения нормальных металлов в токопроводящих обмотках.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Исследования, результаты которых представлены в работе, проводились автором в 1983 – 2004 гг. в отделе криогенных исследований Института физики твердого тела и полупроводников НАНБ в рамках бюджетных и хоздоговорных НИР, выполняемых по плану научно-исследовательских работ в области естественных наук. Перечисленные исследования явились частью работ по темам:

"Исследование кинетических и механических свойств металлов особой чистоты в экстремальных условиях внешнего воздействия: сильное магнитное поле, низкие температуры", №Гос. регистр. 80010958 от 25.02.80, 1980 – 1983 г

"Исследование и разработка методик измерения физических свойств алюминия и его сплавов при низких температурах", № Гос. регистр. 01830433223 от 13.01.83, 1983 – 1985 гг.

Республиканская научно-техническая программа "Информатика" (утверждена постановлением Совета министров БССР №13/434 от 9.12.85 г.). Раздел "Разработать методики измерений и исследовать свойства сверхпроводниковых пленок в зависимости от условий получения для подготовки рекомендаций по выбору оптимальных технологических режимов их формирования", № Гос. регистр. 01880004833, 1988-1990 гг.

"Разработка технологии получения высокотемпературной сверхпроводящей керамики. Экспериментальное исследование зависимости ВЧ потерь и резонансной частоты от температуры в присутствии продольного магнитного поля и без него. Сравнительный анализ результатов с данными, полученными на образцах гиперпроводящего алюминия", х/д № 333, 1985 – 1988 гг.

Комплексная республиканская программа фундаментальных исследований "Научные основы создания новых перспективных материалов" ("Кристалл 2"): Раздел "Исследование кинетических свойств разбавленных упорядоченных сплавов на основе особочистых металлов", № Гос. регистр. 01910037758, от 8.01.91, 1991 – 1995 гг.

Проект по Фонду фундаментальных исследований республики Беларусь "Гальваномагнитные явления в системах с магнитным самовоздействием" договор № Ф40-249 от 1.03.04, № Гос. регистр. 19963609 от 13.12.96 (на основании решения совета Фонда от 28 декабря 1993 г. протокол №2) 1994 – 1996 гг.

Проект по Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных ис-

следований "Магнитодинамическая нелинейность криопроводников в постоянных электрическом и магнитном полях", договор № Ф96 – 204 от 17.02.97, № Гос. регистр. 19973499 от 3.11.97 (на основании решения совета Фонда от 14 февраля 1997 г., протокол № 1) 1997 – 1999 гг.

Республиканская программа фундаментальных исследований "Физические проблемы создания новых полупроводниковых, сверхпроводящих, магнитных, сегнетоэлектрических, сверхтвердых материалов" ("Структура") утверждена постановлением Президиума АНБ от 23.11.95, пр. № 88: Раздел "Низкотемпературные процессы переноса заряда в неупорядоченных системах с металлическим типом проводимости" № Гос. регистр. 1999305 от 27.01.99, 1995–2000 гг.

Проект по Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований "Перенос заряда и магнитостимулированный пинч-эффект токовых линий в проводниках с металлическим типом проводимости", договор № Ф00 – 73 от 01.04.2001, № Гос. регистр. 20014808 от 4.12.01 (на основании решения совета Фонда от 22 февраля 2001 г., протокол № 1) 2001 – 2003 гг.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы заключается в установлении закономерностей воздействия сильного, в том числе неоднородного, магнитного поля на низкотемпературные процессы электропереноса в проводниках с металлическим типом проводимости при больших плотностях тока.

В соответствии с целью работы были сформулированы следующие задачи:

- определить влияние локальных особенностей поверхности Ферми нормальных металлов на их макроскопические электронные характеристики в присутствии малоуглового рассеяния носителей заряда на фонах и линейных дефектах кристаллической структуры;

- установить характер протекания и распределения постоянного тока по сечению металлических проводников геометрии Холла в поперечном градиентном вдоль тока магнитном поле;

- выявить особенности диссипации энергии в однослойных и композиционных двуслойных металлических структурах геометрии Холла при неоднородности их проводящих свойств, обусловленной внешним магнитным полем;

- экспериментально реализовать в криопроводниках состояние с большим уровнем собственного магнитного поля тока; изучить электрические свойства криопроводников при воздействии собственного магнитного поля тока на движение носителей заряда;

- выявить механизмы воздействия магнитного поля на вид вольт-амперных характеристик и температурно-электрических полей в металлических проводниках при неоднородности теплового источника и анизотропии теплоотвода;

- определить влияние флуктуационных и волновых эффектов на поверхностное сопротивление нормальных металлов и высокотемпературных сверхпроводников в условиях слабой локализации носителей заряда.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются низкотемпературные электронные явления переноса заряда и тепла в сильном магнитном поле в нормальных некомпенсированных металлах и высокотемпера-

турных сверхпроводниках.

Предметом исследования являются процессы малоуглового рассеяния электронов проводимости, закономерности распределения постоянного тока в однослойных и двухслойных металлических структурах в неоднородном магнитном поле, нелинейная динамика носителей заряда, температурно - электрические доменные состояния в проводнике при джоулевым разогреве, флуктуационные явления в проводящих средах в условиях слабой локализации носителей заряда.

**Методология и методы проведенного исследования.** В работе применена методология низкотемпературного эксперимента, включающая потенциометрию, магнитометрию, калориметрию, регистрацию поверхностного сопротивления. При проведении исследования использованы поли- и монокристаллы высокочистых алюминия, меди, серебра, а также оксидные высокотемпературные керамические и текстурированные поликристаллические сверхпроводники на основе иттрия и висмута. Разработка экспериментально-аналитических модельных представлений о наблюдаемых закономерностях осуществлена на основе количественного соотнесения данных эксперимента и расчета с использованием принципа соответствия, сходимости физических теорий к известным положениям при предельном переходе по исследуемому параметру.

В экспериментальной части исследования используются методы измерения электросопротивления, магнитоэлектросопротивления, магнитотеплосопротивления, магнитотермоэлектродвижущей силы в магнитных полях до 8 Тл, в диапазоне температур 4.2 – 77 К. В эксперименте реализованы геометрии Холла и Корбино при плотности тока до 800 А/см<sup>2</sup>. Применен метод моделирования пространственной неоднородности проводимости, обусловленной неоднородностью магнитного поля вдоль потока заряда, а также метод измерения распределения потенциала электрического поля и температуры на поверхности металла при вихревом характере постоянного тока. При изучении добротности резонирующей системы, коэффициента отражения света и низкочастотного импеданса применена методика измерения поверхностного сопротивления. Анализ результатов исследования основывается на представлениях о безвихревом характере стационарного электрического поля, соотношениях неразрывности для потока заряда, приближении векторного потенциала для магнитного поля тока, методах функции комплексного переменного и контурного интегрирования, положениях теории теплообмена.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** По результатам комплексного изучения низкотемпературных электронных явлений переноса заряда и тепла в нормальных металлах и высокотемпературных оксидных сверхпроводниках в условиях воздействия сильного магнитного поля впервые:

1. Выявлен диапазон интерференционного влияния друг на друга анизотропного (дислокации, фононы) и изотропного (примеси) электронных механизмов рассеяния, которые приводят к поведению магнитосопротивления и магнитотермоэдс нормальных металлов, не адекватному приближению сумми-

рования вероятностей рассеяния на дефектах из-за изменения типа электронных траекторий и, соответственно, вида электронной функции распределения.

2. Разработан метод экспериментального моделирования воздействия на электрический ток проводника Холла поперечного градиентного магнитного поля. Метод основан на искривлении профиля проводника вдоль тока в соответствии с требуемым законом изменения нормальной компоненты магнитного поля сверхпроводящего соленоида.

3. Построена модель скинирования постоянного электрического тока в криопроводниках геометрии Холла в условиях воздействия на ток неоднородного магнитного поля. Модель позволяет описывать распределение плотности тока, исходя из свойств материала (чистота, тип поверхности Ферми, особенности механизмов рассеяния) и параметров магнитного поля (закон изменения поля вдоль потока заряда, величина поля и его градиента).

4. В объемных проводниках некомпенсированных металлов обнаружена нелинейная связь между током и электрическим полем, возникающая за счет воздействия на электрическое сопротивление собственного магнитного поля лоренцевского дрейфа носителей заряда.

5. В некомпенсированных проводниках геометрии Корбино установлены уровни генерации сильного собственного магнитного поля азимутального дрейфа и выявлена связь этого поля с типом поверхности Ферми, чистотой материала, характером воздействия внешнего магнитного поля на движение электронов.

6. В проводниках геометрии Холла и Корбино обнаружена нелинейность вольт-амперных характеристик в режиме стабилизированного тока, имеющая тепловую природу и обусловленная, в том числе, существованием стационарных температурно-электрических доменных состояний.

7. Обнаружено, что в сильном магнитном поле на резистивные свойства высокотемпературных сверхпроводников вблизи температуры сверхпроводящего перехода существенное влияние оказывают флуктуационные эффекты спаривания электронов проводимости и магнитных вихрей.

8. В примесных проводниках на основе алюминия обнаружен эффект подавления внешним магнитным полем микроволнового сопротивления, обусловленный делокализацией электронных состояний при разрушении интерференции на самопересекающихся орбитах.

#### **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Разработанный потенциометрический метод определения электросопротивления металлических проводников геометрии Холла позволяет проводить корректные оценки электросопротивления при любой величине и законе пространственного изменения магнитного поля.

2. Предложенный метод расчета электрического сопротивления однослойных и композиционных двухслойных металлических структур в условиях неоднородности проводящих свойств в магнитном поле может быть применен для оптимизации геометрии и структуры сверхпроводящих кабелей со стаби-

лизирующей оболочкой из нормального металла.

3. Разработанные принципы оценки магнитного поля и его градиента позволяют определить пространственную топологию поля в мощных электромагнитных системах, не прибегая к прецизионному сканированию поля в пространстве.

4. Обнаруженная нелинейность связи между током и электрическим полем в объемных проводниках некомпенсированных металлов может быть использована при разработке элементов с униполярной проводимостью для управления электрическими цепями криогенных магнитных систем.

5. Высокий уровень собственного магнитного поля азимутального тока, генерируемого в алюминиевых проводниках геометрии Корбино, свидетельствует о перспективности использования таких проводников в качестве индуктивных элементов и накопителей энергии.

6. Определенные для алюминиевого криопроводника в форме диска Корбино параметры джоулевого разогрева в зависимости от плотности радиального тока могут быть использованы в расчетах токнесущей способности электрических обмоток при их охлаждении сжиженными газами в диапазоне температур 4.2 – 30 К.

7. Учет выявленных параметров второго кризиса кипения жидкого гелия на поверхности криопроводника позволяет стабилизировать условия теплоотвода от токнесущего проводника и оптимизировать функционирование электромагнитных систем в широком диапазоне тепловых нагрузок.

8. Разработанный импедансный метод расчета электрических параметров коаксиальных резонаторов позволяет оптимизировать геометрические характеристики подобных сосредоточенных систем с обеспечением максимальной добротности при заданном уровне микроволнового сопротивления. Результаты были использованы при конструировании полномасштабных криогенных ускорителей заряженных частиц.

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

1. Фононные и дислокационные механизмы рассеяния электронов проводимости в низкотемпературных явлениях переноса заряда и тепла в металлах как результат интерференционного влияния малоуглового и изотропного процессов рассеяния друг на друга при различной плотности дефектов кристаллической структуры. Трансформирование электронных орбит в условиях магнитоперебросной диффузии и фононного увлечения как причина искажения электронной функции распределения.

2. Скинирование постоянного электрического тока в объемных металлических проводниках геометрии Холла как результат воздействия на движение носителей заряда неоднородного вдоль тока поперечного магнитного поля. Аналитическая модель явления в приближении анизотропного закона дисперсии электронов и некомпенсированности электронного и дырочного объемов.

3. Электрическое сопротивление однослойных проводников и двуслойных композиционных структур геометрии Холла как нелокальная характеристика в

условиях неоднородности проводящих свойств, обусловленной действием магнитного поля.

4. Нелинейность связи между электрическим полем и током в объемных проводниках геометрии Корбино из некомпенсированных металлов как следствие дрейфа носителей заряда под действием силы Лоренца и сильной зависимости электрического сопротивления от магнитного поля.

5. Генерация собственного магнитного поля тока в криопроводниках геометрии Корбино как результат азимутального дрейфа электронов и связь характеристик собственного поля с условиями движения носителей заряда, определяемыми свойствами материала, формой и размерами проводника, параметрами внешнего магнитного поля.

6. Нелинейность вольт-амперных характеристик проводников некомпенсированных металлов в режиме заданного тока, включая стабилизацию напряжения как результат джоулевого разогрева. Устойчивость температурно - электрических доменных состояний в зависимости от уровня неоднородности теплового источника и условий теплоотвода через поверхность проводника при разных режимах кипения хладагента.

7. Квазилинейный характер температурной зависимости микроволнового магнитосопротивления оксидных керамических сверхпроводников на основе иттрия в гелиевой области температур для некваंटующего излучения как следствие активизации дополнительного диэлектрического механизма поглощения энергии высокочастотного поля.

8. Увеличение проводимости объемных текстурированных поликристаллов висмутовых высокотемпературных сверхпроводников вблизи температуры фазового перехода как результат воздействия сильного магнитного поля на флуктуационное спаривание электронов и магнитных вихрей в квазидвумерных системах.

9. Отрицательное микроволновое магнитосопротивление алюминиевых проводников с большим уровнем примесного рассеяния как следствие уменьшения магнитной длины фазовой когерентности электронных волновых функций.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация является обобщением результатов экспериментального исследования, выполненного лично автором и в соавторстве с коллегами и учениками, среди которых – руководитель кандидатской диссертации д.ф.-м.н. В.И.Гостищев, академик Б.Б.Бойко, научный консультант д.ф.-м.н. С.Е.Демьянов, к.ф.-м.н. О.Н.Мазуренко, А.А.Дрозд, Т.А.Криворучко. Совместно с В.И.Гостищевым и С.Е.Демьяновым инициировано изучение анизотропных механизмов рассеяния в электронных кинетических явлениях. Б.Б.Бойко выступал консультантом по вопросам магнитодинамических нелинейных явлений. О.Н.Мазуренко, А.А.Дрозд, Т.А.Криворучко решали отдельные экспериментальные задачи, проводили измерения и компьютерную обработку полученных данных.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты, изложенные в диссертации, были представлены и обсуждены на следующих конференциях: III, IV и V Всесоюзный семинар по низкотемпературной физике металлов (Донецк, 1983, 1985, 1987); VIII Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ (Новосибирск, 1988), I Всесоюзный семинар "Кризисы теплообмена при кипении" (Новосибирск, 1989); VII Всесоюзная научно-техническая конференция "Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры" (Ленинград, 1989); Topical conference on materials aspects of high-temperature superconductors, ICMC-90 (Garmish-partenkirchen, 1990); XIII Всесоюзное совещание "Получение, структура, физические свойства и применение высокочистых и монокристаллических тугоплавких и редких металлов" (Суздаль, 1990); Научно-техническая конференция "Перспективные материалы твердотельной электроники. Твердотельные преобразователи в автоматике и робототехнике" МГЭ и ТП'90 (Минск, 1990); International Conference on Superconductivity, ICSC – 1990 (Bangalore, 1990); Eight International Conference on the Ternary and Multinary Compounds, ICTMC – 8 (Kishinev, 1990); Fourteenth International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference. ICEC/ICMC – 14 (Kiev, 1992); IV International Symposium On Creep and Coupled Processes (Bialystok, 1992); Second annual Seminar "Nonlinear phenomena in complex systems: Fractals, chaos, attractors, bifurcations, phase transition, self-organization" (Polatsk, 1993); Международная конференция "Колебания и волны в экологии, технологических процессах и диагностике" (Минск, 1993); II International. Conference "Nanometer scale science and technology, NANO – II" (Moscow, 1993); 3-я Международная научно-техническая конференция "Современная технология гибридных интегральных микросхем, включая элементы сверхпроводниковой электроники" (Нарочь, 1994); International Conference "Nanomeeting 95" (Minsk, 1995); Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, CEC/ICMC'95 (Columbus, 1995); I и II Международная научно-техническая конференция "Современные средства связи" (Нарочь, 1995, 1997); 16th International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference, ICEC16/ICMC (Kitakyushu, 1996); International Symposium on Interaction of Materials with Environment (Low temperature, Hydrogen, etc.), ISIME'96 (Dalian, 1996); XXI International Conference On Low Temperature Physics (Prague, 1996); Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, CEC/ICMC'97 (Portland, 1997); 7th International Workshop and School "Nonlinear Dynamics and Complex Systems" (Minsk, 1999); 2 Международная научно-техническая конференция "Ультразвуковая техника и технологии" (Минск, 1999); 8th International Conference on Electromagnetics of Complex Media, BIANISOTROPICS 2000, (Lisbon, 2000 ); XXXII Всероссийское совещание по физике низких температур, НТ–32 (Казань, 2000); XIII Международная конференция по постоянным магнитам (Суздаль, 2000); Международная научно-техническая конференция "Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изде-

лий машиностроения" (Минск, 2001); 6 International Conference "Advanced manufacturing operations" (Varna, 2001); International conference "Problems of Interaction of Radiation with Matter" (Gomel, 2001); II Международная научная конференция "Магнитные материалы и их применение", ММП-2002 (Минск, 2002); Международная научно-техническая конференция "Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении" (Минск, 2002); X Национальная конференция по росту кристаллов (Москва, 2002); 11th International School-Conference "Foundation and Advances in Nonlinear Science" (Minsk, 2003); XXXIII Собрание по физике низких температур НТ-33 (Екатеринбург, 2003); Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (Anchorage, 2003); Международная научная конференция "Актуальные проблемы физики твердого тела", ФТТ-2003 (Минск, 2003); Международная научно-техническая конференция "Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов" (Минск, 2003).

**Опубликованность результатов.** По результатам исследования опубликованы 1 монография, 37 статей в научных журналах, 25 статей в сборниках, 43 тезиса докладов на конференциях. Общее количество опубликованных страниц 517.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из общей характеристики работы, шести глав, заключения и списка использованных источников (281 наименование). Полный объем диссертации составляет 212 страниц, включая 69 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1 посвящена исследованию воздействия магнитного поля на электронные явления переноса заряда и тепла в нормальных металлах в условиях сильно выраженной анизотропии рассеяния носителей заряда на фонах и деформационных дефектах. Изучение осуществлено методом регистрации электросопротивления (ЭС), магнитоэлектросопротивления (МС), теплосопротивления (ТС), магнитотеплосопротивления (МТС) и магнитотермоэлектродвижущей силы (МТЭС). В разделе 1.1 представлена методика эксперимента, выполненного на установке, использующей гелиевый криостат со сверхпроводящим соленоидом УИС-1, который явился основной составляющей низкотемпературного эксперимента и во всех остальных разделах работы. Для деформирования объектов при температуре жидкого гелия они помещались в сменные камеры, позволяющие сжимать или растягивать образцы. Использовался специальный механизм нагружения с силовым блоком в теплой зоне. Для создания и изменения концентрации протяженных дефектов была применена ступенчатая пластическая деформация. После каждого шага образец либо дальше деформировали, либо вместе с криостатом отогревали, отжигая точечные дефекты. Это позволяло определить особенности электронного рассеяния при увеличении количества протяженных и точечных дефектов.

В разделе 1.2 представлены результаты изучения функции распределения (ФР) электронов проводимости алюминия при переносе заряда и тепла. Анизотропия рассеяния электронов на дефектах проявляется через нарушение правил Матиссена и Колера. При этом, как установлено, температурная часть сопротивления  $\rho_T$  обнаруживает немонотонную зависимость от степени деформации  $\varepsilon$ . Здесь  $\rho_T = \rho(T) - \rho_0$ ,  $\rho(T)$  – измеряемое сопротивление,  $\rho_0$  – остаточное сопротивление. Теоретическая двухмоментная модель Кагана, Жернова [Л1] не позволяет проинтерпретировать результаты с помощью матричных элементов (МЭ) интегрального оператора рассеяния на фононах  $P_{ik}$  и статических дефектах ( $cR_{ik}$ ) при линейной зависимости МЭ этого оператора от концентрации статических дефектов  $c$ . Выявленную немонотонность  $\rho_T$  можно представить как следствие влияния друг на друга остаточного  $\rho_0$  и фононного  $\rho_{ph} \cong AT^n$  сопротивлений. Они в так называемых "грязном" и "чистом" пределах непостоянны:  $\rho_0^{грязн} \leq \rho_0^{чист}$ ,  $\rho_{ph}^{грязн} \geq \rho_{ph}^{чист}$ . Если  $\rho_T$  больше  $\rho_0$ , то  $\rho_T$  возрастает с увеличением  $c$ , в ином случае вклад дислокационных механизмов рассеяния в  $\rho_T$  отрицателен. Результаты анализа показывают, что в отсутствие магнитного поля рассеяние электронов на дислокациях следует представлять преимущественно изотропным процессом со сдвигом Ферми-распределения из положения равновесия как единого целого.

Взаимодействие электронов с полями напряжений дислокаций отличается от рассеяния на ядрах. Электросопротивление нечувствительно к рассеянию электронов на малые углы из-за наличия транспортного множителя в интеграле столкновений, но малоугловое рассеяние проявляет себя в условиях магнитного поля  $B$ . Экспериментально установлено, что магнитосопротивление  $\Delta\rho_B/\rho$  немонотонно зависит от степени деформации  $\varepsilon$ . Здесь  $\Delta\rho_B/\rho = (\rho_B - \rho)/\rho$ ;  $\rho_B$  и  $\rho$  – сопротивление в поле и в его отсутствие. Немонотонность МС можно проинтерпретировать в рамках теории Кагана-Флерова [Л2], если постулировать зависимость МЭ от плотности дислокаций  $c$ . В случае доминирования дислокационного рассеяния экспериментальный ход МС с ростом деформации качественно отвечает теоретическому:  $\Delta\rho_B/\rho = cR_{11}(c)\eta^i / (cR_{11}(c)(1 - \eta^i) + P_{11})$ ,  $\eta^i = R_{12}^2 / R_{11}R_{22}$ , когда при малых  $\varepsilon$  скорость роста недиагональных матричных элементов, ответственных за анизотропный вклад в ФР, опережает рост диагональных МЭ, а при больших  $\varepsilon$  быстрее возрастают диагональные МЭ.

Низкотемпературный электронный перенос тепла чувствителен к фоновым неупругим механизмам рассеяния. По результатам изучения температурной зависимости ТС  $W_B$  в магнитном поле установлено, что  $W_B$  обнаруживает характерный минимум. Причем при  $B = 0.35$  Тл минимум на кривой  $W_B(T)$  еще имеет место, а для больших полей ТС изменяется монотонно. Это приводит к немонотонному поведению МТС  $\Delta W_B/W$  с максимумом при  $T \sim 20$  К (рис. 1),

который меньше максимума МС на аналогичной температурной зависимости. Слабое ненасыщение  $W_B$  в функции  $B$  обусловлено анизотропией ПФ и рассеянием на фононах с частотой  $\nu^p \cong 10^{10} \text{ с}^{-1}$  и на примесях с  $\nu_0 \cong 4 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ , когда при  $T = 4.2 \text{ К}$  в поле 5 Тл (ларморовская частота  $\Omega \cong 10^{12} \text{ с}^{-1}$ ) условие сильного поля выполнено, а при 20 К ( $\nu$  возрастает на два порядка) нарушено. Возрастание  $\Delta W_B/W$  с температурой происходит за счет увеличения анизотропии ФР, связанной с магнитоперехросной диффузией. Диффузия приводит к инфинитности движения частиц вдоль потока тепла через области вдоль ребер и возле

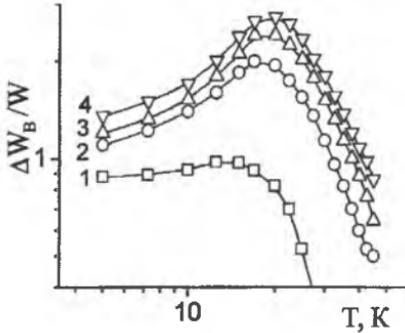


Рис. 1. Магнитотеплосоппротивление  $\Delta l$  как функция температуры в поле  $B$ , Тл: 0.5(1); 3(2); 4(3); 5(4).

Установлено, что для замкнутых траекторий МС обнаруживает экстремум в функции  $\varepsilon$ , означающий усиление зависимости  $\rho_B$  от  $B$ . Это обусловлено различием времени свободного пробега в сильном поле ( $\tau^\infty$ ) и нулевом поле, когда время диффузии через ПФ ( $\tau_F$ ) много больше времени релаксации при брэгговском отражении в сближающихся областях-лунках ( $\tau_U$ ). Согласно теории Гуржи-Копелиовича [Л3]  $\tau^\infty \cong \tau_u(p/r_0)$ , здесь  $r_0$  – размер лунки. Для условия  $\tau^\infty \ll \Omega^{-1} \ll \tau_F$  перекрытие лунок вдоль  $p_x$  создает квазиоткрытые слои с проводимостью  $\sigma_{xx} \propto \Omega^{-2} \tau_U^{-2} (r_0/p)^2$  и квадратичным ростом  $\rho_B$  от  $B$ . Из оценок для  $\rho_0 \cong 10^{-10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  в поле 5 Тл при 10–20 К с  $r_0 \approx (q_p p)^{0.5}$  следует, что  $\tau_U \ll \tau_F \cong 2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . Как результат, МС при 4.2 К обусловлено низкой температурой Дебая ( $^p\theta$ ), когда импульс теплового фонона  $\cong 0.01p$  недостаточно мал, чтобы обеспечить грязный предел с  $\rho_T \ll (\delta_p/p)^2 \rho_0$ .

Для ориентаций вектора  $B$ , приводящих к существованию открытых траекторий,  $\rho_B(\varepsilon)$  и  $\rho_B(T)$  имеют минимумы из-за инфинитности движения носителей в направлении  $\langle 100 \rangle$  по сечениям, включающим большие электронные

вершин первой зоны Бриллюэна. Эти области при 4.2 К имеют нулевую толщину, а при 20 К составляют примерно 0.02 от импульса Ферми  $p$  с характерной температурой перебросов  $T_n \cong 0.25T_0$  (вдоль четверной оси для центра прямоугольных граней  $T_0 \cong 100 \text{ К}$ , для вершин  $T_0 \cong 4 \text{ К}$ ).

В разделе 1.3 представлены результаты изучения рассеяния электронов на деформационных дефектах и фононах в электрических и термоэлектрических явлениях на медных монокристаллических образцах, вырезанных вдоль оси третьего порядка.

группы и перемычки, в узких слоях шириной  $\delta \cong 0.06r$ . Следуя теории, условие промежуточного магнитного поля выполняется при  $\tau_F \beta^{\theta^2} < \Omega^{-1} < \tau_F$  в угловом интервале  $|\varphi^0| < (\Omega \tau_F)^{0.5}$ ,  $\beta^\theta = T/D\theta$ . Это подтверждается зависимостью  $\rho_B(T)$ , где уменьшение  $\rho_B$  имеет место даже при  $T \sim 5$  К, когда  $\rho$  не зависит от  $T$ , т.е. в условиях доминирования электрон-примесного рассеяния ( $\rho = 2.5 \cdot 10^{-10}$  Ом·см,  $\tau_0 \cong 10^{-10}$  с,  $B = 3.5$  Тл,  $\Omega \tau_0 \cong 100$ ) и малости вклада электрон-фононного рассеяния ( $\rho_{ph} \cong 0.01\rho$ ,  $\tau_F = 1.6 \cdot 10^{-8}$  с,  $\Omega \tau_F = 10^4$ ,  $\Omega \mathcal{V}^p \cong 2$ ,  $v^{p-1} \cong \tau_F (T/D\theta)^2$ ).

Как результат, показатель степени  $n$  в полевой зависимости МС  $\rho_B \propto B^n$  уменьшается. Следовательно, в то время как для замкнутых траекторий релаксация определяется электрон-примесным рассеянием с элементами переброса, эффективная длина пробега на открытых сечениях обусловлена диффузионным механизмом опустошения открытых траекторий.

Термоэлектродвижущая сила  $Q$  меди определяется энергетическим спектром и температурой. Здесь МТЭС  $Q_B(T)$  установлена для ориентаций  $B$ , приводящих к существованию слоя открытых траекторий и замкнутых. В первом случае  $Q_B(T) > 0$ , во втором  $Q_B(T) > 0$  при  $T \geq 5$  К и  $Q_B(T) < 0$  при  $T \cong 4$  К. Результаты проинтерпретированы в приближении теории Ильевского - Копелиовича [Л4] с учетом диффузионного вклада  $Q_d$  и эффектов увлечения  $Q_p$  в электронных слоях, содержащих узкие перемычки, где из-за большой кривизны ПФ взаимодействие электронов с поперечными фононами эффективно. Поглощение фононов и их генерация в процессе релаксации электронов с дальнейшим поглощением как на перемычках, так и на выпуклых частях ПФ приводит к взаимному увлечению частиц. Установлено, что при сильной диффузии по перемычке плотность электронов на выпуклой части ПФ велика и составляющая увлечения  $Q_p < 0$ . Магнитное поле уменьшает область "чистой" диффузии, воздействуя на фононную составляющую. При вытянутых орбитах  $Q_p$  превышает  $Q_d$ , что приводит к положительности  $Q_B$ , поскольку  $B$  увеличивает долю перебросных процессов в  $Q_p$ . Это происходит за счет смещения электронов из выпуклых областей к перемычкам и ограничения диффузии. Показано, что в случае замкнутых траекторий ограничение диффузии через перемычки не столь велико, что обуславливает отрицательность  $Q_B$ , подавляемую нормальными процессами рассеяния на вогнутых участках поверхности Ферми.

В главе 2 представлены результаты изучения закономерностей протекания постоянного тока в проводниках из алюминия и меди в геометрии Холла при неоднородности проводимости вдоль направления потока заряда, обусловленной действием поперечного градиентного магнитного поля. Потенциальный безвихревой характер стационарного электрического поля в условиях неоднородности проводимости приводит к перераспределению тока, и его вихревая структура отображается в пространственном распределении потенциала поля  $\varphi(x, y)$ .

Раздел 2.1 носит обзорный характер. В нем кратко анализируются различные аспекты скинирования постоянного тока в проводящих средах. Особое внимание уделяется роли однородного магнитного поля в реализации статического скин-эффекта за счет пространственной зависимости проводящих свойств в компенсированных металлах, полуметаллах и полупроводниках, соответственно, при диффузном поверхностном рассеянии, при направленном изменении концентрации кристаллических дефектов и неоднородном распределении легирующей примеси [Л5, Л6]. Градиентное магнитное поле также является причиной пространственного перераспределения тока по проводнику. Работы, в которых был обнаружен и на качественном уровне изучен этот эффект в алюминии [Л7, Л8], явились исходными для данного исследования.

В разделе 2.2 описывается методика эксперимента. Разработан новый способ задания градиента магнитного поля вдоль транспортного направления проводника  $\partial B_z / \partial x$  искривлением профиля образца, что обеспечивает регулярное изменение локальной нормальной компоненты внешнего поля  $B_z$  вдоль проводника в соответствии с требуемым законом изменения поля. Описаны приемы определения профилей и изготовления образцов, позволяющие реализовать градиенты поля различной величины и симметрии, а также техника потенциометрических измерений.

В разделе 2.3 представлены результаты изучения протекания тока в проводниках из алюминия при линейном законе изменения поля  $B$  вдоль тока. Этот закон используется как наиболее простой для построения экспериментально-аналитической модели. Экспериментально установлена степень соответствия закономерностей распределения  $E(y)$  и  $\varphi(y)$  существующим положениям. Показано, что на одной из боковых граней проводника потенциал  $\varphi$  и его изменение вдоль тока велико (грань сильного сигнала), а на другой грани, соответственно, мало (грань слабого сигнала). Инвертирование тока  $I$  сохраняет распределение  $\varphi(x, y)$  по абсолютной величине. Инвертирование поля  $B$  отражает сигналы – грань сильного сигнала становится слабой, и наоборот.

Аналитическая модель явления построена на основании уравнения Лапласа для потенциала 
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \frac{2\beta}{1+\beta^2} K \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{1-\beta^2}{1+\beta^2} K \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \quad (\beta = \Omega \tau, \quad K = \partial \beta / \partial x),$$
 замкнутого условиями непротекания тока через боковую поверхность проводника и равенством тока через поперечное сечение току источника. Использование метода разделения переменных привело к следующему решению: 
$$\varphi(x, y) = -I\beta \exp(Ky) \{ \sigma [\exp(Kb) - 1] \}^{-1},$$
 здесь  $t$  и  $b$  – толщина и ширина образца,  $\sigma$  – проводимость в нулевом магнитном поле. Из решения следует, что плотность поперечного тока по объему равна нулю, а неравенство нулю токового вихря обуславливает зависимость компоненты тока  $j_x$  от  $y$ . Последнее реализуется через сжатие или перераспределение линий тока к одной из холловских

граней:  $j_x(y) = \frac{IK \exp(Ky)}{t[\exp(Kb) - 1]}$ . Полученный вид потенциала применен в квазиизотропном приближении для анализа поведения  $\varphi(x, y)$  алюминиевого проводника. Соответствие расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о допустимости квазиизотропного приближения для описания явления скинирования тока в алюминиевых проводниках в магнитных полях до 1 – 1.5 Тл при градиентах поля до 0.05 – 0.1 Тл/см.

В разделах 2.4 и 2.5 представлены результаты изучения протекания тока в алюминии в сильноградиентном магнитном поле, а также в проводниках из меди. Показано, что при больших градиентах  $\partial B_z / \partial x$  влияние поля  $B$  на ток вдоль образца неодинаково из-за зависимости  $\rho_B$  от  $B$ . В эксперименте смоделированы нелинейные законы изменения  $B$  вдоль  $x$  – экспоненциальный  $B = B_0 \exp(kx)$  и квазиквадратичный  $B = B_0 + B'x + \alpha^B x^2 / 2$  с параметрами неоднородности поля:  $k$  (0.01 – 1 см<sup>-1</sup>) и  $B'$ ,  $\alpha^B$  (0.05 – 1 Тл/см, 0.05 – 3 Тл/см<sup>2</sup>). Установлено, что вдоль потока заряда  $\varphi(x)$  является нелинейной функцией  $x$ . Перераспределение  $\varphi$  вдоль  $y$  происходит в пределах значений, не превышающих холловскую разность потенциалов для однородного  $B$ , равного локальному полю в данном сечении. Показано, что при малом градиенте прирост потенциалов  $\varphi$  сильной и слабой граней одного знака, а при значительном градиенте и нелинейном законе изменения поля вдоль тока  $\varphi$  слабой грани изменится противоположно  $\varphi$  сильной грани, обнаруживая немонотонность (рис. 2).

$$j_x = \frac{If \exp(fy)}{t \exp[fb] - 1}; j_y = -\frac{I}{t} f'_x \frac{\exp[fy]}{\exp[fb] - 1} \left\{ y - b \frac{\exp[fb]}{\exp[fb] - 1} \right\}; f = \frac{d}{dx} \left( \frac{R^H B}{\rho_{xx}} \right) \quad (1)$$

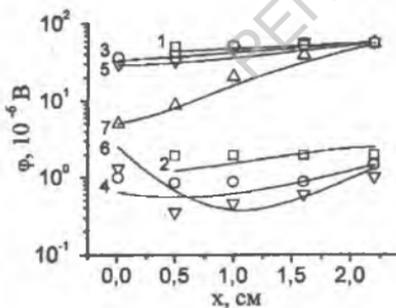


Рис. 2. Потенциал  $\varphi$  вдоль тока:  $B'$ , Тл/см;  $\alpha^B$ , Тл/см<sup>2</sup>: 0.9; 0.1 (1, 2); 1.0; 0.5 (3, 4); 0.7; 1.0 (5, 6); 0.15; 2.6 (7); грани сильного (1, 3, 5, 7) и слабого (2, 4, 6) сигналов.

В условиях линейной зависимости сопротивления  $\rho_B$  от  $B$  показана возможность существования тока Холла (1). Вихревая структура тока определяется поведением параметра  $f(x)$ , учитывающим свойства материала ( $R^H$  – коэффициент Холла,  $\rho_{xx}$  – диагональная компонента тензора сопротивления  $\hat{\rho}$ ). Потенциал, рассчитанный по следующей из (1) формуле

$$\varphi = H^{-1} R^H (B_0 + B'x + 0.5 \alpha^B x^2) \exp[f(y - b)]$$

количественно соответствует эксперименту (рис. 2), что позволяет сделать вывод о корректности выбранной модели. Поведение  $\varphi(x, y)$  определяется соотношением между градиентом магнитного поля и скоростью пространственного

изменения компоненты сопротивления  $\rho_{xx}$  вдоль тока.

Для оценки влияния неоднородности магнитного поля на протекание тока в металлах с различной топологией ПФ введен обобщенный феноменологический тензор проводимости  $\hat{\sigma}$ . Входящий в него параметр  $\alpha$  определяет степень влияния слоя открытых орбит на кинетические свойства материала, при этом отношение  $\alpha/\beta$  принимается по абсолютной величине. В отсутствие открытых траекторий параметр  $\alpha$  равен нулю, а  $\hat{\sigma}$  принимает вид тензора для замкнутой ПФ. В отличие от грязных образцов, удовлетворяющих правилу Колера, сопротивление алюминия высокой чистоты характеризуется линейной зависимостью от магнитного поля, связанной с появлением слоя протяженных траекторий ( $1/\beta^2 > \alpha/\beta$ ). Для Си с открытой ПФ параметр  $\alpha/\beta$  сравнительно велик ( $1/\beta^2 < \alpha/\beta$ ), что приводит к поведению, отвечающему закону Капицы.

$$\hat{\sigma} = \sigma \begin{pmatrix} \frac{1}{\beta^2} + \frac{\alpha}{\beta} & \frac{1}{\beta} & \frac{1}{\beta} \\ -\frac{1}{\beta} & \frac{1}{\beta^2} + \frac{\alpha}{\beta} & \frac{1}{\beta} + \frac{\alpha}{\beta} \\ -\frac{1}{\beta} & -\frac{1}{\beta} + \frac{\alpha}{\beta} & 1 \end{pmatrix}$$

Скинирование постоянного тока в металлах можно проанализировать, исходя из следующего уравнения для потенциала поля  $\varphi$ :

Скинирование постоянного тока в металлах можно проанализировать, исходя из следующего уравнения для потенциала поля  $\varphi$ :

$$\left(\frac{1}{\beta^2} + \frac{\alpha}{\beta}\right)'_x \varphi'_x + \left(\frac{1}{\beta^2} + \frac{\alpha}{\beta}\right) \varphi''_{xx} - \frac{\beta'_x}{\beta^2} \varphi'_y + \left(\frac{1}{\beta^2} + \frac{\alpha}{\beta}\right) \varphi''_{yy} - \frac{\beta'_x}{\beta^2} \varphi'_z + \varphi''_{zz} = 0 \quad (2)$$

здесь  $\varphi'_x, (\dots)'_x$  — производные по координате  $x$ . Если учесть, что для тонкого образца можно пренебречь движением носителей вдоль  $\mathbf{B}$ , то метод разделения переменных приведет к решению уравнения для некоторых частных случаев. Для  $\beta'_x/(1 + \alpha\beta) = \text{const}$  при  $\alpha \rightarrow 0$  и линейном законе изменения магнитного поля вид решения  $\varphi = C_1 \int \beta^2 \exp(\beta' y) dx$  подобен выражению для квазисвободного электронного газа. Для  $\beta'/\alpha\beta = \text{const}$ , что соответствует экспоненциальному закону изменения поля, и при  $\alpha\beta > 1$  решение представляется в виде  $\varphi = C \exp(k_1 x + k_2 y)$ . Последний вариант решения характерен для меди и означает меньший по сравнению с алюминием уровень скинирования тока при численно сопоставимых параметрах по локальной неоднородности магнитного поля и чистоте материала. Фактически значительное число электронов на вытянутых орбитах меди ограничивает дрейф электронов в поперечном направлении.

Глава 3 посвящена исследованию воздействия стимулированной магнитным полем неоднородности проводимости на сопротивление однослойных пластинчатых, а также двухслойных композиционных проводников на основе алюминия и меди. Одна из задач электродинамики неоднородных сред заключается в том, чтобы по заданной неоднородности свойств проводника определить его эффективные параметры, характеризующие диссипацию энергии. При этом реальность оценок эффективного сопротивления проводника зависит от

точности расчета интегральной джоулевой мощности и от корректности потенциометрических методов определения сопротивления.

В разделе 3.1 представлены результаты изучения воздействия скинирования постоянного тока на интегральное сопротивление проводников геометрии Холла (рис. 3). Показано, что измерение разности потенциалов вдоль тока на боковых гранях проводника позволяет количественно определить его сопротивление в неоднородном магнитном поле  $R^e/R^0 = (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi)/\Delta\varphi$ , здесь  $R^e$ ,  $R^0$  – сопротивление в неоднородном и однородном поле,  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$  – разность потенциалов для граней сильного и слабого сигналов,  $\Delta\varphi$  – то же в однородном поле. Корректность потенциометрических оценок  $R^e/R^0$  подтверждается соответствием с результатами, полученными из расчетов интегральной джоулевой мощности. Последние проведены с учетом скинирования тока (1), а также характеристик материала и магнитного поля (выражение (3)):

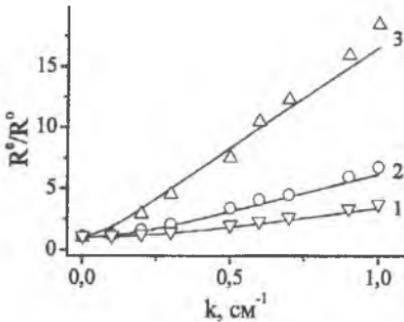


Рис. 3. Сопротивление  $R^e$ , приведенное к сопротивлению  $R^0$  в однородном поле  $B$ , как функция относительного градиента  $k$ : поле  $B$ , Тл: 0,5 (1), 1 (2), 5 (3); символы – расчет; линии – теория.

Здесь общий множитель описывает вклад в  $R^e/R^0$  от тока вдоль оси образца. Поправочный член связан с боковым дрейфом частиц, зависящим от степени влияния неоднородности магнитного поля на параметр  $f$  и его производную вдоль  $x$ . Слабо насыщающееся сопротивление  $\rho_{xx}$  с  $f' \approx 0$  характерно для Al. Для материалов с  $\rho_{xx}$  пропорциональным  $B$ , в числе которых Cu, условие  $f' = 0$  выполняется при экспоненциальном законе изменения  $B$ . С учетом поведения  $\rho_{yx}$  и  $\rho_{xx}$  полученные результаты проэкстраполированы на область температур от гелиевых до азотных. Показано, что разработанные алгоритмы применимы для расчета параметров обмоток магнитных систем. Причем при выборе толщины шины следует брать отношение  $R^e/R^0$  порядка единицы для оптимизации заполнения обмотки током.

В разделах 3.2 и 3.3 описано воздействие магнитостимулированной неоднородности проводимости на протекание тока вдоль границы раздела двухслойных композиционных проводников с омическим контактом между слоями. Аналоги таких материалов используются в качестве стабилизаторов сверхпроводящих кабелей. Исследование выполнено с целью анализа электрических свойств композитов, для которых характерен аномальный магниторезистивный эффект, когда реальное сопротивление значительно больше расчетной величины, полученной в приближении параллельного соединения проводников. Ана-

$$\frac{R^e}{R^0} = \frac{fb \exp(2fb) - 1}{2 [\exp(fb) - 1]^2} \left\{ 1 + \frac{f'^2}{f^4} \left[ 1 + \frac{fb \exp(fb)}{\exp(2fb) - 1} \right] \right\}$$

Здесь общий множитель описывает вклад в  $R^e/R^0$  от тока вдоль оси образца. Поправочный член связан с боковым дрейфом частиц, зависящим от степени влияния неоднородности магнитного поля

литическое изучение осуществлено для гипотетического проводника, представляющего собой композицию из алюминия и его электронного аналога ( $Al^+-Al$ ) с зеркальной симметрией тензоров  $\hat{\rho}$ , а также для реальных проводников ( $Al-Cu$ ) и ( $Al$ -сплав на основе  $Al$ ). Используется условие однородности тока вдоль  $x$ , что с учетом  $j$ - и  $k$ -компонент ротора безвихревого электрического поля  $E$  приводит к однородности  $x$ -составляющей поля  $E_x$ . Из условия равенства нулю циркуляции  $E$  вдоль контура, замкнутого по границе раздела, а также в приближении слабой зависимости плотности транспортного тока  $j_x$  и плотности холловского тока  $j_y$  от поперечной координаты  $y$ , были получены выражения для  $j_x$  и  $j_y$ . Для задания константы интегрирования использовано то, что поле Холла на границе раздела двухслойного проводника  $E_y|_{z=0}$  должно трансформироваться к физически реалистичному виду. При одинаковой толщине  $t$  слоев и зеркальности тензоров  $\hat{\rho}$  для двух составляющих композит металлов, как в ( $Al^+-Al$ ), это поле отсутствует. Когда толщина слоев и вид тензоров  $\hat{\rho}$  неодинаковы,  $E_y|_{z=0}$  определяется вкладом обоих слоев. При одинаковости  $\hat{\rho}$  обоих элементов это равносильно использованию одного материала, и  $E_y|_{z=0}$  стремится к значению поля Холла этого материала. При значительном превышении толщины одного из элементов над другим  $E_y|_{z=0} = -AE_x$ , где

$$A = \left[ \sum_M^{M1_{r-}} t_M \sigma_{yxM} \right] \left[ \sum_M^{M1_{r-}} t_M \sigma_{yyM} \right]^{-1},$$

а индексы  $M_i$  указывают на то, характеристика

какого из входящих в композит металлов должна быть учтена. Полученное таким образом выражение для эффективного удельного сопротивления  $\rho$ , как коэффициента связи между компонентой  $E_x$  и усредненной по поперечному сечению плотностью тока  $\langle j \rangle$ , учитывает свойства материалов элементов композиционного материала и их размеры (выражение (4)):

$$\rho \equiv \sum_M^{M1_{r-}} t_M \left[ \sum_M^{M1_{r-}} \frac{t_M}{\rho_M} - \sum_M^{M1_{r-}} \frac{\left[ (R_M^H B) \rho_M^{-1} + A \right] R_M^H B}{\rho_{0M} \rho_M b^{-1}} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\rho_{0M} \rho_M t_M}{\left[ \rho_M^2 + (R_M^H B)^2 \right] b} \right) \right] \right]^{-1}$$

здесь  $\rho_{0M}$  и  $\rho_M$  — продольная и поперечная диагональные компоненты  $\hat{\rho}$ ,  $b$  — ширина проводника. При одинаковой проводимости материалов, составляющих композит, и при большой величине отношения толщины к ширине одного или обоих элементов роль холловского дрейфа электронов минимальна. В этих условиях  $\rho$  определяется через диагональные компоненты  $\hat{\rho}$ , т.е. аналогично тому, как складываются контактансы при параллельном соединении проводников. При незначительных толщинах элементов граница раздела в существенной степени определяет вид токового распределения по проводнику и вклад холловского дрейфа в резистивность значителен. В выражение для обратного сопротивления входят диагональные компоненты  $\hat{\sigma}$ , сильно зависящие от маг-

нитного поля и приводящие к ухудшению проводимости.

При однородности внешнего магнитного поля скинирование тока в композиционных проводниках может быть вызвано армирующими составами. Обычно это твердые растворы нормальных металлов, содержащие магнитные примеси, из-за которых, в зависимости от геометрических параметров композита, магнитное поле и его топология в объеме проводника может отличаться от поля внешнего источника. Анализ распределения поля в сечении полого цилиндрического магнитного проводника, содержащего внутри материал другого сорта, выполнен в приближении скалярного потенциала для длинного образца, ориентированного нормально внешнему полю. Установлено, что магнитное поле во внутреннем проводнике однородно и параллельно полю внешнего источника, причем наблюдается тенденция его уменьшения с уменьшением толщины наружного слоя цилиндра. На основании проведенного анализа предлагается метод уменьшения величины и градиента магнитного поля в композиционных проводниках посредством формирования на их поверхности тонкого магнитного покрытия. Используя материал с соответствующей магнитной проницаемостью и регулируя толщину покрытия, можно обеспечить требуемый уровень экранировки.

Глава 4 посвящена изучению электрических свойств объемных образцов алюминия и меди при протекании тока большой плотности. Исследование проведено с целью расширения представлений о механизмах электрической нелинейности, в дополнение к известным процессам в пленочных образцах компенсированных металлов, ослабляющим статический скин-эффект в собственном неоднородном поле тока [Л9]. В металлах нелинейность электрических свойств реализуется при сильной чувствительности сопротивления  $R$  к собственному магнитному полю тока  $B_s$ . Если говорить об объемных проводниках, то поле значительной величины реализуется в геометрии Корбино за счет движения электронов по квазикруговым траекториям. При этом просматривается аналогия с многовитковыми проволочными катушками. В цилиндрических проводниках Корбино на радиальный ток действует аксиальное внешнее магнитное поле. В условиях потенциальности электрического поля возникает азимутальный ток, величина которого определяется видом тензора сопротивления  $\hat{\rho}$ .

В разделах 4.1 и 4.2 описана методика эксперимента и обсуждаются закономерности воздействия на электрическое поле проводника геометрии Корбино квазициклического движения электронов. При таком движении вероятность рассеяния электронов возрастает, поскольку за время дрейфа вдоль радиуса проводника они проходят большой путь в азимутальном направлении. Естественно, что закон зависимости сопротивления  $R$  от магнитного поля  $B$  отличен от наблюдающегося в проводниках Холла. Сопротивление в проводниках Корбино выражается через обратную диагональную компоненту тензора проводимости. Измерялось сопротивление  $R$  образцов в форме дисков из Al и Cu, а также, для сравнения, монокристаллического медного образца в форме парал-

лелепида с ориентацией, приводящей к существованию открытых траекторий. Результаты измерения свидетельствуют, что сопротивление диска из Al обнаруживает нелинейность в функции магнитного поля  $R \propto B^n$  с  $n \cong 1.85$  при температуре 4.2 К. С увеличением  $T$  показатель  $n$  уменьшается за счет роста количества тепловых фононов, достигая значения 1.59 при 19 К. Сопротивление диска из Cu также нелинейно зависит от магнитного поля  $R \propto B^n$ , но описывается меньшим показателем степени  $n$  при 4.2 К ( $n \cong 1.15$ ). В то же время для пластинчатого образца из Cu открытые траектории стимулируют близкую к квадратичной зависимость сопротивления  $R$  от поля  $B$ , точнее,  $R \propto B^n$  с  $n \cong 1.9$  при 4.2 К. Сделан вывод, что для алюминия слой протяженных траекторий в образцах Корбино ослабляет зависимость сопротивления от поля  $B$ , уменьшая показатель степени  $n$ , а в образце Холла, напротив, усиливает эту зависимость.

Установлено нелинейное поведение потенциала  $\varphi$  в функции радиального тока  $I$  в проводниках геометрии Корбино из алюминия и меди. Очевидно, что диапазон нелинейности по току для алюминия шире, чем для меди. Причина явления — в дополнительной резистивности, стимулированной собственным магнитным полем азимутального дрейфа  $B_S$ , которое алгебраически складывается с внешним полем соленоида  $B_0$ , задавая так называемую коллинеарную либо антиколлинеарную геометрию протекания тока. Из значений разности потенциалов  $\Delta\varphi$  вдоль радиуса при коллинеарной  $\Delta\varphi_c$  и антиколлинеарной  $\Delta\varphi_a$  геометриях определен нечетный по току  $I$  прирост  $\Delta\varphi_n$ . Нелинейная поправка  $\Delta\varphi_n = (\Delta\varphi_c - \Delta\varphi_a)/2$  характеризует динамический магнетизм в системе.

Анализ экспериментальных данных по распределению потенциала вдоль радиуса диска осуществлен с учетом локальных значений радиальной плотности тока  $j_r$  и компонент тензора сопротивления  $\hat{\rho}$ . Вид этих характеристик зависит от внешнего поля  $B_0$  и собственного поля азимутального тока  $B_S(r)$ . Собственное поле было оценено методом векторного потенциала в приближении малости радиальной и аксиальной компонент плотности тока  $j_r$  и  $j_z$  по сравнению с азимутальной составляющей  $j_\theta$ :

$$B_S(r) \cong \frac{\mu_0 I R^H B_0}{4\pi \rho} \left\{ \frac{2}{r} \ln \frac{r_2(1+\sqrt{2})}{r + \sqrt{r^2 + r_2^2}} \left( 1 - \frac{1}{4} \frac{r^2}{r^2} \right) + \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{r^2}{r^2} \right) \left[ \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_2^2}} - \frac{1}{r\sqrt{2}} \right] \right\} \quad (5)$$

Это выражение использовано для расчета потенциала электрического поля в функции радиуса  $\varphi(r)$ , (выражение (6)):

$$\varphi(r) \cong \frac{I (R^H B_0)^2}{2\pi \rho} \ln \left( \frac{r}{r_1} \right) \left\{ 1 + \frac{R^H \mu_0 I}{\pi \rho \ln \left( \frac{r}{r_1} \right)} \left[ \frac{1}{r} \ln \left( \frac{r + \sqrt{r^2 + r_2^2}}{r_2} \right) - \frac{1}{r_1} \ln \left( \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + r_2^2}}{r_2} \right) \right] + \dots \right\}$$

Видно, что потенциал содержит линейный по току член и поправку, не зависящую от  $B_0$ . Показано, что результаты эксперимента и расчета численно соот-

ветствуют друг другу в начальном токовом диапазоне (рис. 4). Таким образом, предложенная модель, учитывающая плотность потока заряда, закон дисперсии и геометрические размеры образца, допускает отклонение от закона Ома в массивных проводниках геометрии Корбино.

В разделе 4.3 представлены результаты экспериментального исследования распределения собственного поля  $B_S(r)$  в зависимости от величины внешнего магнитного поля  $B_0$  и плотности радиального тока  $j_r$ . Для проводников из алюминия и меди оценена энергия собственного поля тока, её объемная плотность, а также индуктивность и характеристическое время переходных процессов.

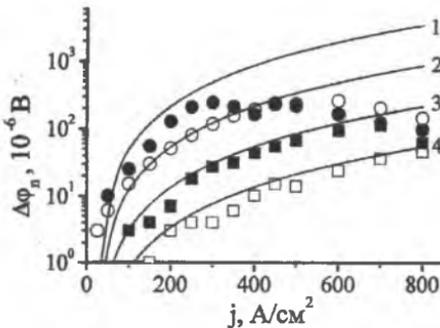


Рис. 4. Нелинейная поправка к разности потенциалов  $\Delta\phi_n$  как функция плотности тока в поле  $B_0$ , Тл: 8 (1); 4 (2); 2 (3); 1 (4); символы — эксперимент, линии — расчет.

Установлено отличие  $B_S$  в меди и алюминии для образцов сопоставимой чистоты и размеров. Для алюминия показатель степени  $n$  в аппроксимации  $B_S \propto B_0^n$  примерно равен 1, а для меди  $n \cong 0.2$ . Указанное расхождение обусловлено различным видом тензоров сопротивления  $\hat{\rho}$  поликристаллических образцов при открытой и замкнутой поверхности Ферми, что приводит к разным соотношениям между азимутальным и радиальным током. Для алюминия  $j_\theta \approx (\Omega\tau)j_r$ , а для меди  $j_\theta \approx (\Omega\tau)^{1/3}j_r$ . Установлено, что для

алюминиевого диска рост собственного магнитного поля тока наибольший при относительно малых величинах внешнего поля. При  $B_0 \cong 1$  Тл величина  $B_S \cong 0.5$  Тл, т.е. собственное поле составляет порядка 50% от внешнего. В поле  $B_0 \cong 8$  Тл максимальная величина  $B_S \cong 1.5$  Тл. Медь обнаруживает свойства динамического магнетизма на один-полтора порядка хуже, чем алюминий. Энергия магнитного поля диска Корбино оценена по аналогии с многovitковой катушкой. Использован термин индуктивности как коэффициент связи между величиной энергии и квадратом тока. Установлено, что плотность энергии магнитного поля Al диска Корбино примерно одного порядка с плотностью энергии многovitковой катушки. Показано, что для диска Корбино характеристическое время переходного процесса  $t_0$  как отношение накопленной энергии к квадрату тока  $I^2$  и сопротивлению зависит только от чистоты материала. Поскольку плотность энергии поля диска пропорциональна квадрату азимутального тока, который, в свою очередь, пропорционален  $\Omega\tau$ , то этот параметр эквивалентен числу токовых витков.

В разделе 4.4 анализируются особенности генерации и распределения собственного магнитного поля тока  $B_S(r)$  в зависимости от формы проводников Корбино из алюминия и меди при различных соотношениях между средним

диаметром и длиной проводника. Рассмотрены некоторые профили осевых сечений цилиндрических проводников, которые задают переменное поперечное сечение для радиального тока. Бесконечно тонкий диск Корбино как предельный случай, реализуемый на практике при среднем радиусе диска значительно большем его толщины, характеризуется следующим распределением поля:

$$B_S(r) \approx \frac{\mu_0 I R^H B_0}{16\pi\rho} \left[ \frac{1}{r_1+r} - \frac{1}{r_2+r} + \frac{r_1}{(r_1+r)^2} - \frac{r_2}{(r_2+r)^2} + \frac{r_1^2}{(r_1+r)^3} - \frac{r_2^2}{(r_2+r)^3} \right] \quad (7)$$

здесь  $r_1$  и  $r_2$  – внутренний и внешний радиусы диска. Установлены законы распределения  $B_S(r)$  для проводников с переменной высотой  $t$ . К примеру, при  $t = k_2 r$ , что означает трапециевидное осевое сечение, собственное поле имеет

$$\text{вид } B_S(r) = \frac{\mu_0 \rho_\alpha I}{4\pi\rho_{\theta\theta} k_2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_2} \right). \text{ Для проводника, у которого толщина } t = 1/k_3 r,$$

т.е. изменяется по закону гиперболы,  $B_S(r) = \frac{\mu_0 \rho_\alpha I}{2\pi\rho_{\theta\theta} k_3} (r_2 - r)$ .

Показано, что собственное поле азимутального дрейфа также воздействует на движение частиц, переопределяя величину силы Лоренца. Для учета этого самовоздействия расчет поля  $B_S$  длинных проводников Корбино (цилиндров) целесообразно проводить самосогласованно, пренебрегая всеми остальными компонентами поля, кроме аксиальной, и исходя из закона полного тока  $j_\theta = -\mu_0^{-1} dB_z/dr$ . Оценки сделаны для проводников из алюминия и меди с учетом соотношения  $\rho_\alpha/\rho_{\theta\theta}$ , определяющего эффективность преобразования радиального дрейфа носителей заряда в азимутальный. При гиперболическом профиле осевого сечения магнитное поле для цилиндра из Al представлено как

$$B = B_0 \exp \left[ \frac{I e \tau}{2\pi m k_3} (r_2 - r) \right], \text{ а для цилиндра из Cu: } B = \left[ B_0^{2/3} + \frac{\mu_0 I}{3\pi l} \left( \frac{e \tau}{m} \right)^{1/3} \ln \frac{r_2}{r} \right]^{3/2}$$

Можно прогнозировать поведение проводника Корбино в качестве сердечника электромагнита, где даже при малой длине цилиндра собственное поле тока, суммируясь с полем обмотки, может удвоить энергию системы. Для сердечника, у которого высота значительно больше его среднего радиуса (тороидальная конфигурация), следует ожидать дополнительного увеличения энергии за счет самовоздействия. Иными словами, проводник Корбино может работать как активный элемент (сердечник), способный увеличивать энергию магнитного поля электромагнита. Рабочие параметры сердечника зависят от материала, а также от формы и соотношения между его длиной и диаметром.

Глава 5 посвящена изучению воздействия тепловых механизмов на нелинейность электрических свойств объемных проводников из алюминия и меди при джоулевом разогреве. Интенсивное тепловыделение при протекании токов большой плотности сопровождается кризисными явлениями в кипении крио-

генных жидкостей при переходе от пузырькового к пленочному режиму теплоотвода. Исследуются вольт-амперные характеристики (ВАХ) проводников. Анализируются новые механизмы структурирования температурных полей в режиме управления по току в условиях действия сильного магнитного поля. В качестве аналога рассматриваются известные доменные состояния бареттерного типа [Л10]. Процессы теплового упорядочения рассматриваются для проводников двух геометрий, Холла и Корбино. Электрическая нелинейность тепловой природы определяется процессами генерации, распространения и отвода тепла через поверхность проводника. Она исследуется с учетом температурного поведения функций тепловыделения  $q_+$ , связанной с зависимостью от  $T$  сопротивления проводника и теплоотвода  $q_-$ , характеризующей параметры хладагента с немонотонным  $N$  – образным поведением при переходе между двумя режимами кипения.

В разделе 5.1 описываются условия эксперимента, обеспечивающие интенсивность джоулевого тепловыделения, достаточную для реализации немонотонной зависимости  $q_-$  от  $T$  при смешанном пузырьково-пленочном режиме кипения хладагента. Показано влияние динамики частиц, существенно различающейся для геометрии Холла и Корбино, на объемную плотность генерируемой мощности  $\rho^2$  и температурные коэффициенты функций  $q_+$  и  $q_-$ . Для проводников геометрии Холла  $q_+' > 0$ , а для проводников геометрии Корбино  $q_+' < 0$ . Учтено, что при охлаждении проводников жидким азотом влияние топологии ПФ и магнитного поля на интенсивность джоулевого тепловыделения можно не учитывать. Для достижения критических тепловых потоков при использовании в качестве хладагента гелия следует подбирать соответствующие размеры образцов. В геометрии Холла образцы должны быть порядка единиц миллиметров, а в геометрии Корбино – порядка сантиметров, что связано с меньшей величиной  $\rho$  в первом случае. Образцы имели токовые и потенциальные контакты, на поверхности располагались датчики, регистрировавшие локальную температуру. Использование дисков Корбино переменной высоты позволило моделировать эффекты тепловой нелинейности для распределенных тепловых источников с разной степенью пространственной неоднородности.

В разделе 5.2 представлены результаты изучения температурных состояний проволочных и пластинчатых проводников геометрии Холла. Анализ гистерезисного поведения ВАХ позволял установить, что переход от пузырькового к пленочному кипению хладагента происходит через зарождение в некоторой части образца разогретого светящегося участка – домена. Он разрастается в виде бегущей температурной волны, но процесс может быть замедлен, если в ходе роста домена уменьшить ток через образец. Промежуточное состояние может существовать в течение нескольких минут. Длительность зависит от близости тока к критическому значению, при котором уровень выделения тепла компенсируется теплоотводом при неоднородном распределении температуры.

Показано, что переход проводника в однородное температурное состояние, характеризующееся пленочным кипением азота и нелинейной зависимостью напряжения  $U$  от тока  $I$ , можно описать уравнением теплового состояния

$$c \frac{dT}{dt} - \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \rho j^2 + q_- = 0, \text{ здесь } c - \text{теплоемкость, } \kappa - \text{теплопроводность, } q_-$$

приведена к единице длины. Соотношение между  $q_+$  и  $q_-$  и их температурными производными приводит к положительности суммы линейных по  $T$  членов указанного уравнения, означая асимптотическую неустойчивость доменного состояния между двумя стационарными режимами с однородным распределением температуры по проводнику.

Установлено, что при охлаждении проводника геометрии Холла жидким гелием при общем гистерезисном виде ВАХ в области с пузырьковым кипением хладагента наблюдается нелинейная зависимость составляющей электрического поля вдоль тока от плотности тока  $E$  от  $j^n$ . Нелинейность обусловлена действием собственного магнитного поля тока и термоэлектрическими механизмами при ограниченности теплоотвода через поверхность. Зависимость характеристик от вида поперечного сечения образцов доказывает, что при больших плотностях тока  $j$  на поверхности могут развиваться температурные градиенты ощутимой величины. Действительно, экспериментально зарегистрированы перепады температуры  $T$  между холловскими гранями, аналогичные эффекту Эттингсгаузена и нечетные по магнитному полю  $B$  и току  $I$ . Анализ показал, что в условиях ограниченного отвода тепла через боковые грани (адиабатичность) термический вклад в электрическое поле может достигать десятков процентов. Для оценки распределения температуры по сечению проводника при адиабатичности вдоль холловского направления использовано приближение линейной и квадратичной зависимости кинетических коэффициентов от температуры  $T$ . Соответствующее уравнение стационарного состояния принимает вид

$$\frac{\partial^2 T^2}{\partial z^2} + a \frac{\partial T^2}{\partial z} + d T^2 + b = 0, \text{ здесь } a, d, b - \text{константы, включающие}$$

производные первого и второго порядка по  $T$  от кинетических коэффициентов. Решение этого уравнения позволяет представить электрическое поле с учетом

тепловых сил как  $E_x = \rho_{xx} j_x \left( 1 + Q(Q^* T_0)^{-1} \right)$ . Видно, что для образцов из не-

компенсированного металла тепловая поправка в  $E_x$  отрицательна и может достигать 100% от собственно омического слагаемого.

В разделе 5.3 представлены результаты изучения тепловых состояний проводников геометрии Корбино, которые характеризуются асимптотической устойчивостью температурно-электрических доменов. Анализируется роль магнитного поля и его градиента в работе теплового источника при формировании доменной структуры. Установлено качественное различие вольт-амперных характеристик дисков различных диаметров, толщин и форм. Для диска постоянной толщины (1мм) ВАХ монотонна, с тенденцией к насыщению падения на-

пряжения  $U$ , что означает доминирование магнитодинамических механизмов над разогревными. Для дисков большей постоянной толщины (2 и 4 мм) ВАХ вначале линейна, но в сильных магнитных полях  $U$  проходит через максимум. Причем экстремум при антиколлинеарной геометрии протекания тока растягивается в плоский участок, стабилизируя  $U$  в некоторой области значений  $I$ . Для дисков с гиперболическим сечением характеристики линейны вплоть до значения  $I$ , при котором происходит скачкообразный переход на участок стабилизации  $U$ . В этих условиях сосуществуют разогретые (домены) и неразогретые участки с постепенным уменьшением "холодных" зон за счет расширения "горячих". Температурные датчики показывают, что состояние с  $dE = 0$  при наличии доменов является устойчивым и объясняется отрицательной дифференциальной проводимостью  $\frac{dE}{dj} = \frac{j}{E} \frac{(q_- \rho)'_T}{(q_- / \rho)_T}$ . Анализ теплового состояния провод-

ника Корбино, проведенный с учетом температурного поведения  $q_+(T)$  и  $q_-(T)$  (рис. 5), показывает, что при однородной температуре  $T$  образца стабилизация  $U$  невозможна и  $N$ -образный вид  $q_-(T)$  обуславливает развитие доменной структуры. Несовпадение ВАХ при коллинеарной и антиколлинеарной геометриях исследовано с учетом различий в генерации и отводе тепла в направлениях нормали к поверхности диска и вдоль радиуса (уравнение (8)):

$$c \frac{dT}{dt} = \rho j^2 - q_- + \rho'_T j^2 T + 2\rho j T \frac{dj}{dr} \left( \frac{dT}{dr} \right)^{-1} - q'_- T + \kappa_{rr} \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{\kappa_{rr}}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d\kappa_{rr}}{dB} \frac{dB}{dr} \frac{dT}{dr},$$

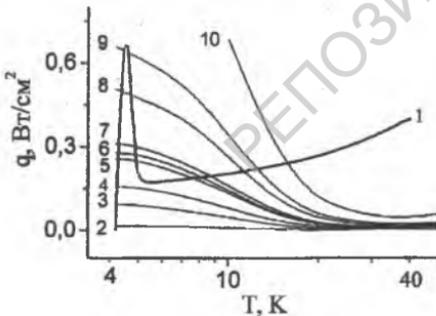


Рис. 5. Кривая кипения гелия (1) и плотность потока тепла через поверхность диска толщины  $t$ , мм: 1 (2-9); 0.5 (10), в поле  $B$ , Тл: 1 (2); 4 (4, 6); 8 (3, 5, 7, 9); 9 (8, 10), при токе  $I$ ,  $10^3$  А: 0.6 (3); 1.0 (5); 1.2 (4, 7); 1.6 (2, 6, 9, 10); 1.2 (7); 1.4 (8).

Нестационарное уравнение теплового состояния (8) описывает, в том числе и воздействие магнитного поля на выделение и распространение тепла в объеме проводника. Анализ выполнен в приближении линейной теории устойчивости при разложении температуры на два слагаемых. Первое отвечает стационарному состоянию, второе описывает возмущение в виде произведения функций времени и координат, задаваемых внешними ограничениями. Знак параметра устойчивости  $\chi$  определяет динамику системы во времени, а линейное уравнение  $L(\zeta)T_c = \chi T_c$ , дополненное соответствующими краевыми условиями,

определяет распределение температуры в объеме. Установлено, что характеристическое выражение для параметра устойчивости  $\chi$  (9) позволяет качественно

описать вид ВАХ и тепловое состояние проводников геометрии Корбино. Данное выражение учитывает направление протекания тока, форму проводника, распределение теплового источника, условия передачи тепла по объему образца и его охлаждения при кипении хладагента на поверхности:

$$\chi = \left[ \rho_T' j^2 + 2\rho j \frac{dj}{dr} \left( \frac{dT}{dr} \right)^{-1} + \frac{dk_{rr}}{dB} \frac{dB}{dr} \frac{dT}{dr} \frac{1}{T} - q_+' \right] c^{-1} - \gamma_k^2 \quad (9)$$

здесь  $\gamma_k$  – собственные значения лапласиана с учетом граничных условий. Температурное поле устойчиво, если возникшее в некоторый момент времени отклонение от стационарного состояния не увеличивается со временем ( $\chi \leq 0$ ).

Для реализации доменной структуры требуется выполнение условия  $\gamma_k^2 > 0$ .

Диск гиперболического сечения имеет однородное тепловое поле и для него

$\chi = \left[ \rho_T' j^2 - q_+' \right] c^{-1} - \gamma_k^2$ . При разогреве до температуры, близкой к значению, характеризующему переходной режим, появившийся домен сохраняется из-за  $q_+' < 0$ .

Для дисков толщины 1 мм устойчивое состояние имеет место во всем диапазоне изменения тока без стабилизации  $U$  из-за выполнения условия  $\partial j / \partial r < 0$ , приводящего к разогреву в центре ( $\partial T / \partial r < 0$ ). Для дисков толщины 2 и 4 мм слагаемое  $\partial j / \partial r < 0$  также присутствует, но оно мало по абсолютной величине. Однако при антиколлинеарной геометрии магнитная составляющая параметра устойчивости положительна  $\frac{dk_{rr}}{dB} \frac{dB}{dr} \frac{dT}{dr} \frac{1}{T} > 0$ , что приводит к возможности перехода в неоднородное состояние с  $\gamma_k^2 > 0$ .

При цилиндрической симметрии задачи это означает появление кольцевых разогретых зон, на которых компенсируется дополнительная разность потенциалов из-за малости сопротивления этих участков по сравнению с холодными областями. При коллинеарной геометрии градиентное магнитное слагаемое в параметре устойчивости меньше нуля и система остается устойчивой без появления разогретых зон.

Глава 6 посвящена изучению электронных явлений в нормальных металлах и высокотемпературных сверхпроводниках в переменном электромагнитном поле для квазистационарного тока, а также в микроволновом и оптическом диапазоне. Такие диапазоны выбраны, чтобы определить степень влияния магнитного поля на свойства проводника при различном соотношении частот: столкновительной (носителей заряда с дефектами), ларморовской и частоты внешнего электромагнитного поля. Рассматриваются кинетические явления при значительном превышении ларморовской частотой частоты внешнего поля, при близости частот по порядку величины и при относительной малости ларморовской частоты, когда магнитное поле не является основным фактором, воздействующим на динамику частиц. Исследуемой характеристикой является поверхностное сопротивление. В зависимости от частотного диапазона оно оценивается на основе измерений объемной проводимости, добротности или

интенсивности отраженного света. Рассмотрены некоторые особенности проявления волновых свойств носителей заряда.

В разделе 6.1 описаны методика эксперимента и закономерности низкочастотного размерного эффекта в алюминии. В этом диапазоне частот диссипативные процессы неоднозначны и не описываются по классическим схемам, поскольку "размыта" граница между нормальным и аномальным скин-эффектами. Измерение сопротивления выполнено потенциометрически, мостовым методом, в режимах постоянного и переменного тока. Установлена критичность поперечных размеров проводника в их влиянии на перенос заряда. Большая проводимость криопроводников ограничивает диапазон нормального скинирования областью порядка десятков герц. При этом на пространственное распределение квазистационарного тока сильное влияние оказывает магнитное поле, которое уменьшает фактор временной дисперсии за счет воздействия на динамику носителей. Показано, что в режиме индукционного разогрева цилиндрического проводника в азимутальном переменном магнитном поле диссипативные свойства зависят от соотношения между радиусом кривизны проводника и глубиной скин-слоя, которые для ослабления рассеяния энергии следует выбирать так, чтобы увеличить отношение этих параметров.

В разделах 6.2 и 6.3 проанализировано поведение криопроводников в микроволновой области по результатам исследования их поверхностного сопротивления. Сопоставляются свойства нормальных металлов и высокотемпературных оксидных сверхпроводников, в том числе и с точки зрения их восприимчивости к действию магнитного поля. Высокотемпературные сверхпроводники выступают как альтернатива нормальным металлам в высокочастотных устройствах, но остается открытым вопрос об уровне их активных потерь по сравнению с металлами. С другой стороны, поведение оксидных сверхпроводящих материалов вблизи фазового перехода в значительной степени отвечает классическим представлениям, что позволяет анализировать их поведение на основе известных положений.

Вещественная часть поверхностного сопротивления  $r_s(T)$  изучена методом регистрации добротности  $Q'$  коаксиального резонатора, который применен по причине "запредельности" объемных систем такого частотного диапазона для рабочей полости криостата. Разработан алгоритм расчета параметров резонатора на основе графического решения трансцендентного тождества, связывающего волновое сопротивление коаксиального отрезка с сопротивлением сосредоточенной емкости. Алгоритм позволил определить оптимальные параметры резонатора: приведенная длина  $\cong \pi/4$ ,  $Q' \cong 1700 - 1800$  при  $T = 300$  К. На основе результатов измерения  $r_s(T)$  в алюминии и меди в диапазоне 300 - 4.2 К можно оценить роль примесей и фононов в поверхностном сопротивлении. Для высокочистого Al характерна пипшардовская нелокальность при 60 - 70 К, а для меди выход  $Q'$  на насыщение происходит при 10 К из-за малой длины свободного пробега электронов. Установлено, что при 4.2 К поперечное магнитное поле улучшает добротность алюминиевого резонатора, воздействуя на протекание

тока по короткозамкнутой поверхности. Обосновывается гипотеза, что эффект улучшения добротности обусловлен движением электронов опорных точек ПФ, покидающих скин-слой  $\delta$  без рассеяния и ускоряющихся в течение лармовского периода. При этом совокупная эффективная проводимость, обусловленная электронами центральных экстремальных сечений и электронами опорных точек, может быть представлена как  $\sigma^{ef} \equiv \sigma_0 \frac{\delta}{\nu} \left( \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\Omega^{-1}} \right) \frac{1}{1 + (\Omega\tau)^2}$ , здесь

$\sigma_0$  – проводимость в нулевом магнитном поле. Анализ явления в приближении дисперсионных соотношений для волн геликонной геометрии показал, что об-

ратный поверхностный импеданс вида  $Z_S^{-1} = \left[ \frac{i\sigma_0^e \mp \beta + i}{\mu_0\omega (1 + \beta^2)} \right]^{0.5}$ , где  $\sigma_0^e = i\sigma_0/kl$ ,

приводит к увеличению добротности резонатора с ростом  $B$  при  $\beta < 1$ . На основании экспериментальных данных для алюминия и меди сделан вывод, что в присутствии магнитного поля диапазон температур с доминированием локальной связи между высокочастотными током и полем расширяется. Изменение микроволнового сопротивления в функции температуры при различном уровне чистоты проводящего материала оказывается существенно меньшим по сравнению с изменением сопротивления постоянному току.

Изучение свойств иттриевых оксидных сверхпроводников в виде керамических коаксиальных резонаторов показало целесообразность использования этих материалов для элементов, не требующих последующей деформации (магнитные экраны, резонаторы, полосковые линии и др.). Для неквантующего излучения установлен квазилинейный характер температурного поведения поверхностного сопротивления вместо ожидаемого экспоненциального  $r_f(T) \sim \exp(-T_c/T)$ , здесь  $T_c$  – критическая температура. Показано, что в присутствии магнитного поля увеличение потерь и ослабление влияния температуры приводит к появлению двух типов поведения поверхностного сопротивления в функции магнитного поля  $r_f(B)$ . Переход от сильного роста  $r_f$  с магнитным полем к слабому линейному изменению происходит при 0.06 – 0.07 Тл, соответствующем первому критическому полю. Близкое к квадратичному изменение  $r_f(B)$  при  $B > 0.002$  Тл отвечает поглощению энергии вихревой решеткой в слабых полях при частичном переходе сверхпроводника из мейснеровского в смешанное состояние на поверхностных неоднородностях. Сделан вывод, что величина микроволнового сопротивления иттриевых высокотемпературных сверхпроводящих оксидов при гелиевых температурах равна сотым долям ома, что более чем на порядок превышает сопротивление чистого Al ( $5 \cdot 10^{-4}$  Ом). Вывод подтверждает гипотезу поглощения энергии неметаллической фазой.

Изучение сверхпроводников на основе висмута, кристаллизующихся в виде текстурированных слоистых образцов со слабой разориентацией отдельных кристаллитов, похожих на споду, выполнено на массивных образцах, выращенных методом спонтанной кристаллизации. Поведение их сопротивления

указывает на упорядочение и фазовые превращения в двумерных системах с флуктуациями, приводящими к спариванию электронов при температурах выше критической. Квазидвумерность подтверждается линейным поведением поправки проводимости в функции  $T$  со значением температуры фазового перехода около 83 К. Возможность диссоциации вихревых пар по механизму модели Костерлица-Таулесса [Л11] изучена методом аппроксимации резистивной характеристики к экспоненциально-корневому типу поведения в функции  $T$ . Установлено, что температура Костерлица равна примерно 82.2 К. Исследовано уширение резистивной характеристики сверхпроводника в магнитном поле, обусловленное малой длиной когерентности  $\xi$ , приводящей к явлению необратимости намагничивания. Установлена температурная зависимость второго критического поля  $H_{C2}$  для двух ориентаций магнитного поля  $B$  и выявлена роль механизмов пиннинга и плавления вихревой решетки в рассеянии энергии с характерной температурой, определяемой  $1 - T/T'_c = AH^{2/3}$ . Установлено, что наблюдаемая анизотропия  $H_{C2}(T)$  отвечает свойствам малых образцов, когда геометрические размеры меньше глубины проникновения магнитного поля  $\lambda^*$ . В этих условиях тонкая пленка, имея ограниченную толщиной длину пробега электронов  $l$  и соответствующую длину когерентности  $\xi$ , характеризуется анизотропией  $H_{C2}(T)$  относительно ориентации поля в плоскости пленки и нормально к ней. Степень анизотропии определяется отношением  $\lambda^*(T)/\xi(T)$ .

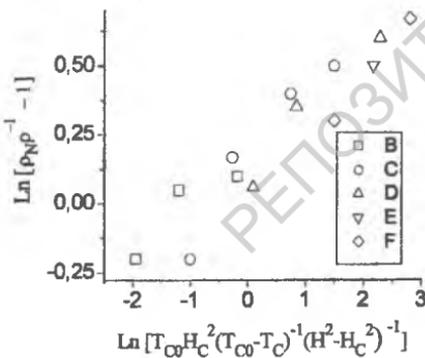


Рис. 6. Относительная флуктуационная поправка к проводимости в магнитном поле для  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+s}$ :  $T$ , К: 80 (B); 78 (C); 76 (D); 74 (E); 72 (F).

лились как функции параметра  $\ln [T_{C0}H_c^2 / (T_{C0} - T_c)(H^2 - H_c^2)]$ . При расчете величина сопротивления на переходной характеристике при заданном магнитном поле  $H$  выбиралась при некоторой температуре и приводилась к сопротивлению в нормальном состоянии. Полученные зависимости показывают линейную связь в диапазоне температур 74 – 80 К (рис. 6), что подтверждает эффективность флуктуаций в магнитных полях, близких к критическому.

Температурные зависимости  $H_{C2}(T)$  были использованы при изучении флуктуаций проводимости в магнитном поле методом построения поправки в соответствии с выражением Асламазова-Ларкина [Л12]

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{T_{C0}H_c^2}{(T_{C0} - T_c)(H^2 - H_c^2)}, \quad \text{здесь } \sigma' -$$

поправка к проводимости,  $\sigma$  – проводимость в нормальном состоянии,  $T_{C0}$  – температура фазового перехода при  $H = 0$ ,  $T_c$  – температура, соответствующая  $H_{C2}$ . Значения величин  $\ln(\sigma'/\sigma)$ , полученные из температурного поведения сопротивления, строились

В разделах 6.4 и 6.5 представлены высокочастотные электронные явления в нормальных металлах. При их интерпретации учтен волновой характер движения частиц, реализуемый в межзонных переходах, а также при большом уровне примесного рассеяния. Результаты эксперимента по магнитоотражению линейно поляризованного света высокочистыми металлами (Cu, Ag) в области частот ниже плазменной свидетельствуют, что изменение степени поляризации излучения в магнитном поле, нормальном плоскости падения, обусловлено составляющей интенсивности в плоскости падения. Спектральная зависимость степени поляризации напоминает осцилляции плотности состояний на уровнях Ландау, приводящие к эффекту Шубникова. Анализ внутризонных электронных процессов показывает, что магнитодинамическое воздействие на отражение света возможно при интенсивности излучения  $\cong 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>, а линейный вклад магнитного поля в коэффициент отражения является малой неосциллирующей функцией до тех пор, пока ларморовская частота не достигнет оптического диапазона. Сделан вывод об активации межзонных *s*- и *d*- переходов в поляризационных спектрах магнитоотражения.

Квантовые явления в металлах в условиях электрон-примесного рассеяния приводят к локализации частиц. Изучение волновых процессов проведено с целью выявления экспериментальных условий существования квантовой интерференции и ее адаптации к линиям передачи сигналов между элементами микросхем. Установлено, что формализм волнового пакета при анализе кинетических свойств малых образцов металлов с использованием борновского приближения позволяет через интеграл столкновений оценить время свободного пробега  $\tau$ , которое зависит от размеров проводника  $\tau^{-1} \propto N_p \left(1 + c^{1/3} / N_p^{1/3}\right)$  (*c* и  $N_p$  – концентрация и число примесных атомов). Фактически суперпозиция промежуточных состояний приводит к появлению в  $\tau$  как суммы вероятностей рассеяния на всех примесных атомах по теории хаотических фаз, так и интерференционных поправок, вытекающих из операции возведения в квадрат суммы амплитуд вероятностей переходов.

Экспериментальное изучение воздействия магнитного поля на кинетические явления в примесных проводниках алюминия показало, что эффекты локализации электронов на самопересекающихся траекториях могут изменить проводимость, если длина когерентности волновой функции значительно превышает длину свободного пробега. При изучении микроволновых явлений и статической проводимости обнаружен положительный коэффициент в магнитополевой зависимости добротности алюминиевого резонатора. Установлено, что интерференция амплитуд электронных волн на самопересекающихся траекториях увеличивает поверхностное сопротивление и статическое сопротивление примесного проводника. На основании эксперимента сделан вывод, что магнитное поле является более удобным параметром для реализации и изучения квантовой локализации по сравнению с температурными механизмами воздействия на фазовую когерентность электронной волновой функции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе низкотемпературных электрических, гальвано- и термомагнитных исследований установлен характер воздействия дислокаций, фононов и примесей на функцию распределения электронов и кинетические коэффициенты нормальных металлов. Выявлены закономерности протекания тока большой плотности в криопроводниках геометрии Холла и Корбино при воздействии на поток заряда неоднородных внешнего и собственного магнитных полей. Установлены механизмы делокализации электронов в явлениях переноса заряда в объемных образцах с высоким уровнем примесного рассеяния. На основании полученных экспериментальных данных построены физические модели скинирования постоянного тока в неоднородном магнитном поле и нелинейности электрических свойств при возникновении температурных доменных состояний в условиях кризисных явлений при кипении хладагента [1].

Основные результаты и выводы работы формулируются следующим образом:

1. По результатам экспериментального исследования низкотемпературного магнитоэлектросопротивления, магнитотеплосопротивления и магнитотермоэдс высокочистых алюминия и меди в условиях доминирования дислокационного и фононного механизмов рассеяния:

- показано, что деформационная зависимость электросопротивления характеризуется ростом изотропной составляющей функции распределения электронов проводимости с увеличением плотности дислокаций, а поведение магнитоэлектросопротивления как функция деформации адекватно описывается в приближении вариационного метода при постулировании нелинейной зависимости матричных элементов интегрального оператора рассеяния электронов от плотности дислокаций [3, 10, 43, 57, 77];

- доказано, что температурное поведение магнитотеплосопротивления и магнитотермоэдс алюминия и меди определяется влиянием примесного и фононного механизмов рассеяния электронов проводимости на эффективность процессов переброса, генерирующих протяженные электронные траектории в условиях диффузии и фононного увлечения электронов в областях с отрицательной кривизной поверхности Ферми [4, 5, 8, 9, 14, 39, 65].

2. Экспериментально установленные закономерности распределения потенциала электрического поля в проводниках высокочистого алюминия геометрии Холла, обусловленные сильным градиентом магнитного поля, и анализ вихревой структуры постоянного тока при различных законах изменения поперечного магнитного поля вдоль тока позволили:

- разработать физическую модель скинирования постоянного электрического тока, согласно которой неоднородность распределения плотности потока заряда по поперечному сечению проводника формируется в условиях дрейфа заряженных частиц между холловскими гранями. Направление дрейфа определя-

ется градиентом магнитного поля и скоростью изменения в пространстве диагональной компоненты тензора сопротивления [19, 20, 29, 47, 79, 88];

- предложить потенциометрический метод определения эффективного сопротивления криопроводника в неоднородном магнитном поле, корректность которого подтверждается оценочными расчетами интегральной джоулевой мощности, выделяемой в объеме проводника при тех же условиях [27, 34, 53, 60, 72, 80];

- показать влияние градиентного магнитного поля на протекание тока в проводниках металлов с открытой поверхностью Ферми, введя в анализ обобщенный феноменологический тензор проводимости, учитывающий существование слоя открытых траекторий различной толщины [20, 29, 53, 58, 67, 89].

3. Решение задачи протекания постоянного тока в двухслойных композиционных проводниках геометрии Холла в присутствии магнитного поля, учитывающее воздействие элементов композита друг на друга в области границы раздела, позволило:

- установить, что поперечный дрейф носителей заряда под действием силы Лоренца в условиях раскомпенсации холловских разностей потенциалов двух металлов на границе раздела приводит к неоднородному распределению плотности тока по сечению элементов композита [20, 27, 59, 60];

- определить электросопротивление композита в магнитном поле как нелокальную характеристику, зависящую от разности холловских коэффициентов металлических элементов, других компонент их тензоров сопротивления и соотношения их геометрических размеров [35, 59, 91, 100, 101, 102];

- определить пространственное распределение магнитного поля в объеме двухэлементного коаксиального цилиндрического проводника с учетом толщины слоев элементов и их магнитной проницаемости [36, 38, 92, 96, 97].

4. Экспериментальное изучение распределения электрического и магнитного полей в объемных некомпенсированных проводниках геометрии Корбино при переносе заряда большой плотности позволило:

- обнаружить в алюминии отклонение от закона Ома, обусловленное суммарным воздействием на электроны проводимости и кинетические характеристики внешнего магнитного поля и собственного поля азимутального дрейфа носителей заряда, при этом нелинейная поправка сравнима с величиной электрического поля в линейном приближении [22, 78, 81, 103];

- установить, что в отсутствие джоулевого разогрева, когда максимально проявляются динамические свойства электронов проводимости, алюминиевый диск Корбино генерирует собственное магнитное поле тока, достигающее 50% внешнего поля соленоида [21, 54, 82, 103];

- построить количественную модель, определяющую пространственное распределение магнитного поля азимутального дрейфа и описывающую электрические и магнитные свойства проводников геометрии Корбино при протекании радиального тока с учетом типа поверхности Ферми [30, 31, 55, 83];

- показать, что большая плотность энергии собственного магнитного поля

азимутального дрейфа позволяет рассматривать криопроводник геометрии Корбино в качестве индуктивного элемента с переменным числом витков, равным отношению длины свободного пробега электрона к ларморовскому радиусу [23, 28, 84, 87].

5. Полученные для металлических проводников геометрии Холла и Корбино экспериментальные вольтамперные характеристики в условиях стабилизированного тока большой плотности, задающего уровень джоулевого разогрева при дефиците мощности теплоотвода, позволили показать, что:

- для проводников геометрии Холла переход между однородными температурными состояниями, соответствующими пузырьковому и пленочному режимам кипения хладагента, сопровождается появлением квазистационарных доменных структур, длительность существования которых определяется степенью различия параметров тепловыделения и теплоотвода в неоднородном и однородном температурных состояниях [16, 44, 66];

- воздействие магнитного поля на проводник геометрии Холла в условиях анизотропного теплообмена с криогенной жидкостью приводит к нелинейной связи тепловой природы между электрическим полем и током [11, 15, 40, 64, 68];

- нелинейность электрических свойств проводников геометрии Корбино вблизи кризиса пузырькового кипения гелия характеризуется возникновением устойчивых температурно-электрических доменов [16, 26, 61, 86];

- вероятность появления температурно-электрических доменов в проводниках геометрии Корбино в значительной степени определяется уровнем неоднородности магнитного поля, воздействующего на передачу тепла по объему проводника, при  $N$ -образном виде функции теплоотвода между режимами пузырькового и пленочного кипения хладагента [45, 56, 62, 85].

6. При исследовании низкочастотного и микроволнового импеданса нормальных металлов и высокотемпературных сверхпроводников в сильных магнитных полях:

- в области низких частот обнаружено отсутствие локальной связи между электрическим полем и током, обусловленное переходом к аномальному скин-эффекту [7, 37, 93, 98];

- установлен немонотонный характер магнитополевой зависимости микроволнового сопротивления алюминия, связанный с поглощением энергии электронами опорных точек поверхности Ферми в области перехода от слабого магнитного поля к сильному [32, 33, 50, 73, 94, 95];

- определены величина и квазилинейная температурная зависимость микроволнового магнитосопротивления высокотемпературного иттриевого керамического сверхпроводника, которые свидетельствуют о существовании дополнительного диэлектрического механизма поглощения энергии высокочастотного поля в области гелиевых температур [12, 13, 25, 49, 69].

7. Результаты исследования критических параметров текстурированных поликристаллических оксидных сверхпроводников на основе висмута свиде-

тельствуют об анизотропии их проводящих свойств, проявляющейся в сильных магнитных полях, а резистивные характеристики в области фазового перехода достаточно хорошо описываются в рамках теорий среднего поля Асламова - Ларкина и Костерлица - Таулесса для термодинамических флуктуаций в классических квазидвумерных системах [41, 42, 46, 70, 99, 104].

8. Низкотемпературная спектроскопия отраженного кристаллами меди и серебра линейно поляризованного света в условиях сильного магнитного поля в геометрии Коттона-Мутона позволила:

- обнаружить воздействие магнитного поля на составляющие интенсивности излучения в плоскости падения и перпендикулярно к ней, проявляющееся в осцилляционном поведении степени поляризации в зависимости от длины волны излучения [2, 6, 24];

- выявить возможный вклад в магнитоотражение нелинейных процессов, меж- и внутризонных переходов для  $d$  - и  $s$  - состояний, для которых тип поверхности Ферми исследованных металлов может проявить себя лишь при достижении ларморовской частотой оптического диапазона [24, 63, 105].

9. Изучение воздействия магнитного поля на поведение статической и микроволновой проводимости объемных поликристаллов алюминия с высоким уровнем примесного рассеяния позволили:

- показать, что в малых образцах интерференция амплитуд вероятности рассеяния блоховских электронов на примесных атомах приводит к уменьшению времени свободного пробега и его зависимости от размеров проводника [17, 48, 52, 76, 106];

- доказать, что квантовая интерференция электронных волн на самопересекающихся траекториях, разрушаемая температурой и магнитным полем, воздействующими на длину фазовой когерентности, локализует электронные состояния [18, 51, 75].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [Л1] Каган Ю., Жернов А.П. О природе нелинейной зависимости электросопротивления металлов с примесями // ЖЭТФ. – 1971. – Т. 60, Вып. 5. – С. 1823 – 1844.
- [Л2] Каган Ю., Флеров В.Н. К теории сопротивления и магнетосопротивления металлов при низких температурах // ЖЭТФ. – 1974. – Т. 66, Вып. 4. – С. 1374 – 1386.
- [Л3] Гуржи Р.Н., Копелиович А.И. Низкотемпературная электропроводность чистых металлов // УФН. – 1981. – Т. 133, Вып. 1. – С. 33 – 74.
- [Л4] Ильевский В.И., Копелиович А.И. Магнитотермо-э.д.с. фононного увлечения в нескомпенсированных металлах с открытыми поверхностями Ферми при низких температурах // ФНТ. – 1987. – Т. 13, N 2. – С. 143 – 154.

- [Л5] Кириченко О.В., Песчанский В.Г., Савельева С.Н. Статический скин-эффект в металлах с открытыми поверхностями Ферми // ЖЭТФ. – 1979. – Т. 77, Вып. 5. – С. 2045 – 2060.
- [Л6] Богод Ю.А., Красовицкий Вит.В., Лемешевская Е.Т. Скинирование теплового потока в полуметаллах // ФНТ. – 1987. – Т. 13, N 9. С. 1087 – 1089.
- [Л7] Гостищев В.И., Дрозд А.А., Демьянов С.Е. Распределение электрического поля в алюминии в сильных магнитных полях // ФНТ. – 1978. – Т. 4, № 9. – С. 1131 – 1142.
- [Л8] Токовые вихри в металлах в неоднородном магнитном поле / В.И. Гостищев, С.Е. Демьянов, А.А. Дрозд, О.Н. Мазуренко и др. // ФММ. – 1984. – Т. 57, Вып. 4. – С. 699 – 706.
- [Л9] Песчанский В.Г., Оямада К., Степаненко Д.И. Нелинейное магнитосопротивление компенсированных металлов // ФНТ. – 1991. – Т. 17, N 3. – С. 328 – 330.
- [Л10] Слуцкий А.А., Кадигробов А.М. Электрические домены в металлах при низких температурах // Письма в ЖЭТФ. – 1978. – Т. 28, Вып. 4. – С. 219 – 222.
- [Л11] Kosterlitz J.M., Thouless D.J. Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems // Solid State Phys. – 1973. – Vol. 6. – P. 1181 – 1203.
- [Л12] Асламазов Л.Г., Ларкин А.И. Влияние флуктуаций на свойства сверхпроводника при температурах выше критической // ФТТ. – 1968. – Т. 10, Вып. 4. – С. 1104 – 1111.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### Монография

1. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Электродинамика криопроводников в неоднородном стационарном магнитном поле. – Мн.: Бел. наука, 2003. – 198 с.

### Статьи в рецензируемых журналах

2. Гостищев В.И., Дрозд А.А., Соболев В.Р. Держатель образца с двумя степенями свободы для магнитооптических исследований // ПТЭ. – 1983. – N 2. – С. 216 – 218.
3. Гостищев В.И., Демьянов С.Е., Соболев В.Р. Деформационный механизм рассеяния и функция распределения электронов проводимости в алюминии // ФММ. – 1985. – Т. 60, Вып. 1. – С. 71 – 76.
4. Соболев В.Р., Матвеев В.Н. Термо-э.д.с. меди в магнитном поле // ФНТ. – 1986. – Т. 12, N 1. – С. 98 – 100.
5. Дислокационное рассеяние и перенос заряда в меди / С.Е. Демьянов, В.Р. Соболев, А.А. Дрозд, В.Н. Матвеев // ФНТ. – 1986. – Т. 12, N 3. – С. 315 – 319.

6. Соболев В.Р., Криворучко Т.А. Влияние сильного магнитного поля на поляризацию света отраженного серебром и медью при 4.2 К // ЖПС. – 1986. – Т. XLIV, N 4. – С. 686 – 688.
7. Размерный и частотный эффект в алюминии / В.И.Гостищев, А.А.Дрозд, В.Р.Соболев, Т.А.Криворучко // ФММ. – 1986. – Т. 61, вып. 5. – С. 1038 – 1040
8. Демьянов С.Е., Соболев В.Р. Взаимосвязь деформационного и температурного механизмов релаксации в меди // Металлофизика. – 1987. – Т. 9, N 6. – С. 20 – 23.
9. Гостищев В.И., Дрозд А.А., Соболев В.Р. Особенности низкотемпературного теплосопrotivления алюминия в магнитном поле // ФНТ. – 1988. – Т. 14, N 6. – С. 594 – 598.
10. On the anisotropy of electron-dislocation scattering in aluminum in charge transport / V.I.Gostishev, S.E.Demyanov, V.R.Sobol a.e. // Phys. Stat. Sol. – 1990. – Vol. B160. – P. K133 – K136.
11. Соболев В.Р., Криворучко Т.А. О переносе тепла в анизотропных металлических средах // ИФЖ. – 1990. – Т. 58, N 4. – С.670 – 675.
12. О воздействии магнитного поля на низкотемпературный импеданс ВТСИ иттриевой керамики в диапазоне дециметровых волн / С.Е.Демьянов, А.А.Дрозд, В.Р.Соболев и др. // ФММ. – 1990. – N 9. – С. 80 – 84.
13. Decimeter-wave impedance measurements of Y- and Tl- based superconductors with and without an external magnetic field / S.E.Demyanov, V.R.Sobol, A.A.Droz, D.V.Pashik // Bull. Mater. Sci. – 1991. – Vol. 14, N 3. – P. 807 – 810.
14. Теплофизические свойства продукта горения смеси тетразола и тетразолята натрия / А.И.Лесникович, Г.В.Принцев, С.А.Танаева, В.Р.Соболев // ИФЖ. – 1991. – Т. 61, № 3. – С. 422 – 425.
15. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н., Солонович В.К. Низкотемпературные термомагнитные явления в металлах в условиях джоулева разогрева // ИФЖ. – 1994. – Т. 67, N 3-4. – С. 334 – 339.
16. Гальваномагнитные явления в гиперпроводниках геометрии Корбино при кризисе кипения / Б.Б.Бойко, В.Р.Соболев, О.Н.Мазуренко, А.А.Дрозд // Доклады АНБ. – 1994. – Т. 38, N 3. – С. 33 – 36.
17. The conductivity fluctuations in mesoscopic systems / V.R.Sobol, O.N. Mazurenko, V.K.Solonovich, L.V.Kukhareno // Herald Russian Acad. Tech. Sci. – 1994. – Vol. 1, N 7. – P. 699 – 705.
18. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Quantum interference and conductivity of aluminum // Herald Russian Acad. Tech. Sci. – 1994. – Vol. 1, N 7. – P. 801 – 812.
19. Мазуренко О.Н., Соболев В.Р., Дрозд А.А. Магнитодинамика электронов проводимости Al в неоднородном поле // ФНТ. – 1995. – Т. 21, N 1. – С. 78 – 85.
20. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Magnetostimulated inhomogeneity of electric field in aluminum // Advances in Cryogenic Engineering. – 1996. – Vol. 42. – P. 1071 – 1078.

21. Magnetosensitive conductivity of aluminum and the advantage of Corbino geometry // B.B.Boiko, V.R.Sobol, O.N.Mazurenko, A.A.Drozd // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 1996. – Vol. 42. – P. 1063 – 1069.
22. Sobol V.R., Boiko B.B. Magnetic non-linearity at strong Hall drift // *Czechoslovak Journal of Physics*. – 1996. – Vol. 46(S4). – P. 2033 – 2034.
23. Energy storage in metal devices and the advantages of liquid hydrogen temperatures / V.R.Sobol, O.N.Mazurenko, A.A.Drozd, B.B.Boiko // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. – 1997. – Vol. 10, № 3. – P. 277 – 282.
24. Соболь В.Р., Мазуренко О.Н. О влиянии магнитного поля на частотные явления переноса в проводящих средах / *Изв. Бел. инженер. акад.* – 1997. – N 1(3) / 3. – С. 201 – 204.
25. Соболь В.Р., Мазуренко О.Н. К вопросу моделирования СВЧ свойств проводящих материалов в условиях глубокого охлаждения // *Изв. Бел. инженер. акад.* – 1997. – N 1(3) / 3. – С. 205 – 207.
26. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Galvanomagnetic properties of metals at the heat exchange crisis at boiling of liquid helium // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. – 1997. – Vol. 10, №3. – P. 291 – 296.
27. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. On excessive resistance and heat generation of aluminum conductor due to magnetic field inhomogeneity // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 1998. – Vol. 44. – P. 975 – 981.
28. Novel concept of concentrator of magnetic energy / V.R.Sobol., O.N.Mazurenko, A.A.Drozd, B.B.Boiko // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 1998. – Vol. 43. – P. 325 – 331.
29. Соболь В.Р., Мазуренко О.Н., Дрозд А.А. Магнитостимулированная неоднородность проводимости и нелокальные явления переноса в металлах // *ФНТ*. – 1999. – Т. 25, N 11. – С. 1211 – 1217.
30. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Zoli M. Nonlinear dynamics of carriers in aluminum cryoconductors under the action of crossed electric and magnetic field // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2000. – Vol. 3, N 2. – P. 181 – 187.
31. Соболь В.Р., Мазуренко О.Н. Магнитодинамическая нелинейность электрических свойств некомпенсированных металлов // *ФНТ*. – 2001. – Т. 27, N 1. – С. 60 – 67.
32. Sobol V.R. Low temperature microwave impedance of aluminum in orthogonal magnetic field // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф.Скорины*. – 2001. – №6(9). – С. 57–60.
33. Sobol V.R. Electron iso-energetic surface openness and helicon type wave in metal // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф.Скорины*. – 2001. – №6(9). – С. 53–56.
34. Мазуренко О.Н., Соболь В.Р., Устинович Д.Ф. Физические основы работы материала интегрального полупроводникового датчика магнитного поля // *Материаловедение*. – 2002. – 3 (60). – С. 2 – 5.
35. Соболь В.Р., Мазуренко О.Н., Францкевич Н.В. Расчет электросопротивления композиционного криопроводника на основе высокочистого алюминия –

Труды БГТУ. – Серия VI. – Физ.-мат. науки и информ., Вып. XI. – 2003. – С. 106 – 111.

36. Устинович Д.Ф., Соболев В.Р. Расчет толщины ферромагнитного покрытия ориентированных алмазных зерен. – Материалы, технологии и инструменты. – 2003. – Т. 8, N 4. – С. 27 – 29.
37. Устинович Д.Ф., Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Низкочастотные вихревые токи и диссипативные процессы в условиях магнито-абразивной обработки // ИФЖ. – 2004. – Т. – 77, N 1. – С. – 163 – 166.
38. Устинович Д.Ф., Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Вязкостные эффекты перемagnичивания образца при абразивной обработке в магнитном поле. – Весті НАНБ. – 2004. – N 1. – С. 14 – 17.

#### Статьи в сборниках трудов

39. Гостищев В.И., Дрозд А.А., Соболев В.Р. Низкотемпературный теплоперенос в алюминии в магнитном поле // Теплофизические свойства веществ: Тр. VIII Всесоюз. конф. – Новосибирск, 1989. Ч. II. – С. 179 – 185.
40. Соболев В.Р., Криворучко Т.А. Особенности низкотемпературного переноса заряда и тепла в металлах в магнитном поле // Теплофизические свойства веществ: Тр. VIII Всесоюз. конф. – Новосибирск, 1989. Ч. II. – С. 158 – 164.
41. Growth and Study of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  Superconducting Single Crystals / S.N.Barilo, V.I.Gatalskay, V.R.Sobol e.a. // High-temperature superconductors, Proceedings Topical conference on materials aspects of high-temperature superconductors. – S.a.: Informationsgesellschaft Verlag, 1990. Vol.1. – P. 369 – 373.
42. The anisotropy of the magnetic-field induced resistive transition in single crystal  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  / A.A.Drozhd, A.P.Ges, V.R.Sobol e.a. // Proceedings 8 International Conference on ternary and multinary compounds, Kishinev, 11-14 Sept. 1990. – Kishinev, 1992. – Vol. 2. – P. 195 – 198.
43. Dovgyallo I., Belsky S., Sobol V. On the physical nature of frequency dependence of the cyclic strength of metallic materials // IV International symposium "Creep and coupled processes", Bialystok, 25-27 Sept. 1992. – Bialystok, 1992. – P. 47 – 52.
44. The temperature fields in electrically heated wires at crisis of boiling / V.R.Sobol, T.A.Krivoruchko, L.V.Kukharensko e.a. // Proceedings of Second Annual Seminar "Nonlinear phenomena in complex systems", Polatsk, 15-17 Febr. 1993. – St.Petersburg, 1993. – P. 454 – 458.
45. Boiko B.B., Sobol V.R., Mazurenko O.N. On the appearance of space temperature electric structures in hyperconductors under high magnetic fields // Proceedings of Second Annual Seminar "Nonlinear phenomena in complex systems", Polatsk, 15-17 Febr. 1993. – St.Petersburg, 1993. – P. 445 – 453.
46. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Перенос заряда и сверхпроводимость  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  // 3 Международная научно-техническая конференция "Современная технология гибридных интегральных микросхем, включая элементы сверхпроводниковой электроники". – Нарочь, 1994. – С. 60 – 63.

47. Мазуренко О.Н., Соболев В.Р., Дрозд А.А. Воздействие градиентного магнитного поля на электроперенос в гиперпроводящем Al // 3 Международная научно-техническая конференция "Современная технология гибридных интегральных микросхем, включая элементы сверхпроводниковой электроники. – Нарочь, 1994. – С. 189 – 192.
48. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Примесная интерференция в металлах // 3 Международная научно-техническая конференция "Современная технология гибридных интегральных микросхем включая элементы сверхпроводниковой электроники. – Нарочь, 1994. – С. 185 – 188.
49. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Коаксиальные резонаторы и моделирование СВЧ потерь материалов в условиях глубокого охлаждения // Современные средства связи: Мат. конф. – Нарочь, 1995. – С. 252 – 255.
50. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Низкотемпературные СВЧ свойства алюминия и меди в магнитном поле // Современные средства связи: Мат. конф. – Нарочь, 1995. – С. 256 – 259.
51. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Quasi-two-dimensionality of electron's magnetodynamics in disk samples of Al // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – Minsk. – 1995. – P. 146 – 149.
52. Sobol V.R., Mazurenko O.N. Charge transport in impure metal. // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – Minsk. – 1995. – P. 266 – 267.
53. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Inhomogeneity and local negative magnetoresistance of Al // Proceedings 16 International Cryogenic Engineering Conference. International Cryogenic Materials Conference, Kitakyushu, 20-24 May 1996. – Kitakyushu, 1996. Part 3. – P. 1945 – 1948.
54. Boiko B.B., Sobol V.R., Mazurenko O.N. Magnetic field of cyclic current in cylinder conductors // Proceedings 16 International Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic Materials Conference, Kitakyushu, 20-24 May 1996. – Kitakyushu, 1996. Part 3. – P. 1949 – 1952.
55. Magnetism due to Hall current in aluminum and copper conductors / B.B.Boiko, V.R.Sobol, O.N.Mazurenko, A.A.Drozd // Proceedings 16 International Cryogenic Engineering Conference. International Cryogenic Materials Conference, Kitakyushu, 20-24 May 1996. – Kitakyushu, 1996. Part 3. – P. 1953 – 1956.
56. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Temperature structures at high Hall drift in aluminum // Proceedings 16 International Cryogenic Engineering Conference. International Cryogenic Materials Conference, Kitakyushu, 20-24 May 1996. – Kitakyushu, 1996. Part 3. – P. 1941 – 1944.
57. Влияние воздействия ультразвукового поля на дефектность и прочностные свойства стали / Н.Ф. Лугаков., А.С.Шиялев, В.Р.Соболев, Е.Л.Магер // Ультразвуковая техника и технологии: Материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13-14 ноября 1999. – Мн., 1999. – С. 69 – 70.
58. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Zoli M. Spatial inversion of gyrotropy parameter in conductivity tensor and charge transport peculiarities. // Bianisotropics-2000: 8 Intern. Conf. on Electromagnetics of Complex Media, Lisbon, 27-29 Sept. 2000. –

- Lisbon, 2000. – P. 115 – 118.
59. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Zoli M. Magnetostimulated anisotropy of conductivity and Corbino-like current in composite conductors. // *Bianisotropics 2000: 8 Intern. Conf. of Electromagnetics of Complex Media, Lisbon, 27-29 Sept. 2000.* – Lisbon, 2000. – P. 119 – 122.
60. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Магнитное сжатие линий тока в металлах // *Актуальные проблемы физики твердого тела: Сб. статей.* – Мн.: Беларуская навука, 2003. – С. 462 – 475.
61. Sobol V.R., Mazurenko O.N. Electrical nonlinearity of magnetodynamic nature in metals at high levels of energy dissipation // *Proceedings 11 International Conference Foundation and Advances of Nonlinear Science. Minsk, 22-25 Sept. 2003.* – Minsk, 2004. – P. 94 – 98.
62. Sobol V.R., Frantskevich N.V. About the influence of a magnetic field gradient on stability of the ordered temperature-electric state in conductors of Corbino geometry // *Proceedings 11 International Conference Foundation and Advances of Nonlinear Science. Minsk, 22-25 Sept. 2003.* – Minsk, 2004. – P. 83 – 89.
63. Sobol V.R., Frantskevich N. Nonlinear high-frequency effects in metals at heating skin layer // *Proceedings 11 International conference "Foundation and advances of nonlinear science". Minsk, 22-25 Sept. 2003.* – Minsk, 2004. – P. 90 – 93

#### Тезисы докладов на конференциях

64. Соболев В.Р., Криворучко Т.А. Особенности низкотемпературного переноса заряда и тепла в металлах в магнитном поле // *VIII Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ, Новосибирск, 20-22 сент. 1988 г.* – Новосибирск, 1988. Ч. II. – С. 96 – 97.
65. Гостищев В.И., Дрозд А.А., Соболев В.Р. Низкотемпературный теплоперенос в алюминии в магнитном поле // *VIII Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ, Новосибирск, 20-22 сент. 1988 г.* – Новосибирск, 1988. Ч. II. – С. 98 – 99.
66. Соболев В.Р. О возникновении упорядоченной температурной структуры в металлах, разогреваемых электрическим током, при кризисе кипения криогенной жидкости // *Кризисы теплообмена при кипении: I Всесоюз. семин., Новосибирск, 19-21 июля 1989 г.* – Новосибирск, 1989. – С. 109 – 111.
67. Дрозд А.А., Соболев В.Р., Пашик Д.В. Об измерении параметров сильного неоднородного магнитного поля // *VII Всесоюзная научно-техническая конференция "Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры", Ленинград, 24-26 окт. 1989 г.* – Ленинград, 1989. Ч. I. – С. 184 – 185.
68. Соболев В.Р., Солонович В.К. О теплопереносе в монокристаллических образцах переходных металлов при джоулевым обогреве // *XIII Всесоюзное совещание "Получение, структура, физические свойства и применение высокочистых и монокристаллических тугоплавких и редких металлов", Суздаль, 2-4 окт. 1990 г.* – М., 1990. – С. 55.

69. Decimeter-wave impedance measurements of Y- and Tl - based superconductors with and without an external magnetic field / S.E.Demyanov, V.R.Sobol, A.A.Drozd, D.V.Pashik e.a. // International Conference on Superconductivity, Bangalore, 10-14 January, 1990. – Bangalore, 1990. – P. 13 – 14.
70. The anisotropy of the magnetic-field induced resistive transition in single crystal  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  / A.A.Drozd, A.P.Ges, V.R.Sobol e.a. // Eighth International Conference on ternary and multinary compounds, Kishinev, 11-14 Sept. 1990. – Kishinev, 1990. – P. 226.
71. Дрозд А.А., Соболев В.Р., Крулевич В.Ч. Резистивные свойства массивных монокристаллических ВТСП образцов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  в магнитном поле. // Перспективные материалы твердотельной электроники. Твердотельные преобразователи в автоматике и робототехнике (МТЭ и ТП-90): Тез. науч.-техн. конф., Минск, 23-24 окт. 1990 г. – Мн., 1990. Ч. I. – С. 105 – 106.
72. Соболев В.Р., Кабанов А.А. Нелинейность магнитного поля и вихревой ток в преобразователе Холла // Перспективные материалы твердотельной электроники. Твердотельные преобразователи в автоматике (МТЭ и ТП-90): Тез. науч.-техн. конф., Минск, 23-24 окт. 1990 г. – Мн., 1990. Ч. II. – С. 47 – 48.
73. Sobol V.R., Drozd A.A., Pashik D.V. The low-temperature decimeter wave impedance of aluminium measurements in transverse magnetic field // Fourteenth International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Kiev, 8-12 June, 1992. – Kiev, 1992. – P. 127–128.
74. Sobol V.R., Kruplevich V.Ch., Barilo S.N. Superconducting resistive transition and vortex-pair excitation of bulk  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  crystals // Fourteenth International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Kiev, 8-12 June, 1992. – Kiev, 1992. – P. 99–100.
75. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Quantum interference and conductivity of aluminum // Second international conference on nanometer scale science and technology, Moscow, 2 – 6 Aug., 1993. – Moscow, 1993. – P. 56.
76. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Solonovich V.K. The conductivity fluctuations in mesoscopic systems // Second international conference on nanometer scale science and technology, Moscow, 2 – 6 August, 1993. – Moscow, 1993. – P. 50.
77. Довгялло И.Г., Соболев В.Р., Бельский С.Е.. Исследование физической сущности влияния частоты механических колебаний на характеристики усталости металлических материалов // Международная конференция “Колебания и волны в экологии, технологических процессах и диагностике” Минск, 15-20 сент. 1993. – Мн., 1993. – С. 52.
78. Magnetosensitive conductivity of aluminum and the advantage of Corbino geometry // В.В.Boiko, V.R.Sobol, O.N.Mazurenko, A.A.Drozd //Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Columbus, 17-21 July 1995. – Columbus, 1995. – P. 9.
79. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Magnetostimulated inhomogeneity of electric field in aluminum // Cryogenic Engineering Conference. International

- Cryogenic Materials Conference, Columbus, 17-21 July, 1995. – Columbus, 1995. – P.9
80. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Inhomogeneity and local negative magnetoresistance of Al // 16 International Cryogenic Engineering Conference. International Cryogenic Materials Conference, Kitakyushu, 20-24 May 1996. – Kitakyushu, 1996. – P. 361.
81. Sobol V.R., Boiko B.B. Magnetic non-linearity at strong Hall drift // XXI International conference on low temperature physics, Prague, 8-14 Aug. 1996. – Prague, 1996. – P. 74.
82. Magnetism due to Hall current in aluminum and copper conductors / B.B.Boiko, V.R.Sobol, O.N.Mazurenko, A.A.Drozd // 16 International Cryogenic Engineering Conference. International Cryogenic Materials Conference, Kitakyushu, 20-24 May 1996. – Kitakyushu, 1996. – P. 359.
83. Boiko B.B., Sobol V.R., Mazurenko O.N. Magnetic field of cyclic current in cylinder conductors // 16 International Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic Materials Conference, Kitakyushu, 20-24 May, 1996. – Kitakyushu, 1996. – P. 356.
84. Sobol V.R., Mazurenko O.N. Energy storage in metal devices and the advantages of liquid hydrogen temperatures // International symposium on interaction of materials with environments, Dalian, 27-30 May 1996. – Dalian, 1996. –P. 5.
85. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Temperature structures at high Hall drift in aluminum // 16 International Cryogenic Engineering Conference. International Cryogenic Materials Conference, Kitakyushu, 20-24 May 1996. – Kitakyushu, 1996. – P. 360.
86. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. Galvanomagnetic properties of metals at the heat exchange crisis at boiling of liquid helium // International Symposium on interaction of materials with environments, Dalian, 27-30 May 1996. – Dalian, 1996. – P. 12 – 13.
87. Novel concept of concentrator of magnetic energy / V.R.Sobol, O.N. Mazurenko, A.A.Drozd, B.B.Boiko // Cryogenic Engineering Conference. International Cryogenic Materials Conference, Portland, 1997. – Portland, 1997. – P.81.
88. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Drozd A.A. On excessive resistance and heat generation of aluminum conductor due to magnetic field inhomogeneity // Cryogenic Engineering Conference. International Cryogenic Materials Conference, Portland, 28 July-1 Aug. 1997. – Portland, 1997. – P. 5.
89. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н., Золи М. Скинирование постоянного тока в некомпенсированных металлах // 32-е Всероссийское совещание по физике низких температур: Тез.докл.секции NS “Наноструктуры и низкоразмерные системы”, Казань, 3-6 окт. 2000 г. – Казань, 2000. – С. 121 – 122.
90. Мазуренко О.Н., Соболев В.Р., Устинович Д.Ф. Интегральный полупроводниковый датчик магнитного поля и его градиента // XIII Международная конференция по постоянным магнитам, Суздаль, 25-29 сент. 2000г.– М., 2000.–С. 196.

91. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н., Золи М. Ток Холла и потери в композитном криопроводнике // 32-е Всероссийское совещ. по физике низких температур: Тез. докл. секции NS "Наноструктуры и низкоразмерные системы", Казань, 3-6 окт. 2000 г.: – Казань, 2000. – С. 119 – 120.
92. Устинович Д.Ф., Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Вязкостные эффекты перемagnичивания при абразивной обработке металлов // XIII Международная конференция по постоянным магнитам, Суздаль, 25-29 сент. 2000г.–М., 2000. – С.116
93. Устинович Д.Ф., Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Низкочастотные вихревые токи и диссипативные процессы в условиях магнитоабразивной обработки // XIII Международная конференция по постоянным магнитам, Суздаль 25-29 сент. 2000 г. – М., 2000. –С. 118.
94. Sobol V.R. Low temperature microwave impedance of aluminum in orthogonal magnetic field // International Conference "Problems of Interaction of Radiation with Matter", Gomel, 30 Oct.-1 Sept. 2001. – Gomel, 2001. – P. 96 – 97.
95. Sobol V.R. Electron iso-energetic surface openness and helicon type wave in metal // International Conference "Problems of Interaction of Radiation with Matter", Gomel, 30 Oct.-1 Sept. 2001. – Gomel, 2001. – P. 97–98.
96. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н., Устинович Д.Ф. Магнитное поле полого цилиндрического образца // Магнитные материалы и их применение: тез. докл. II Междунар. науч. конф., Минск, 2-4 окт. 2002 г. – Мн., 2002. – С. 150–151.
97. Соболев В.Р., Устинович Д.Ф. Магнитное ориентирование абразивных зерен // Магнитные материалы и их применение: тез. докл. II Междунар. науч. конф., Минск, 2-4 окт. 2002 г. – Мн., 2002. – С. 146–147.
98. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н., Устинович Д.Ф. Переменное азимутальное магнитное поле и диссипация энергии // Магнитные материалы и их применение: II Междунар. науч. конф., Минск 2-4 окт. 2002г. –Мн., 2002. – С. 148–149
99. Двумерность физических свойств и флуктуационные явления в системе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ . / В.Р.Соболев, Н.А.Каланда, С.А.Гурецкий и др.// X Национальная конференция по росту кристаллов, Москва, 24-29 ноября 2002. – Москва, 2002. – С. 311.
100. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н., Францкевич Н.В. Магнитосопротивление композитного криопроводника на основе алюминия // XXXIII Всероссийское совещ. по физике низких температур: Тез. докл. секции N и S "Сверхпроводимость" и "Наноструктуры и низкоразмерные системы", Екатеринбург, 17-20 июня 2003 г. – Екатеринбург, 2003. – С. 316 – 317.
101. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Frantskevich N.V. Role of interface in a resistance of double strip composite conductor on a basis of aluminum // Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Anchorage, 22-25 Sept. 2003. –Anchorage, 2003. – P. 123.
102. Sobol V.R., Mazurenko O.N., Frantskevich N.V. Influence of Hall coefficient reversal in aluminum on effective resistance of double strip composite conductor.//

- Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Anchorage, 22-25 Sept. 2003. –Anchorage, 2003. – P. 123
103. Соболев В.Р., Мазуренко О.Н. Магнитное поле тонкого диска Корбино // Международная научная конференция “Актуальные проблемы физики твердого тела”, Минск, 4–6 ноября, 2003 г. – Мн., 2003. – С. 222.
104. Соболев В.Р., Калаанда Н.А., Францкевич Н.В. Резистивные свойства текстурированных и керамических втсп образцов висмутатной системы в магнитном поле // Международная научная конференция “Актуальные проблемы физики твердого тела”, Минск, 4–6 ноября, 2003. – Мн. 2003. – С. 224.
105. О влиянии токов проводимости на оптическую активность поглощающих сред / В.Р.Соболев, О.Н.Мазуренко, С.А.Гурецкий и др. // Международная научная конференция “Актуальные проблемы физики твердого тела”, Минск, 4–6 ноября, 2003. – Мн. 2003. – С. 223.
106. Соболев В.Р., Францкевич Н.В. О влиянии интерференционных процессов в рассеянии электронов на проводящие свойства низкоразмерных проводников // XXXIII Всероссийское совещание по физике низких температур: тез. докл. секции N и S “Сверхпроводимость” и “Наноструктуры и низкоразмерные системы”, Екатеринбург, 17-20 июня 2003 г. – Екатеринбург, 2003. – С.314–315.

## РЕЗЮМЕ

Соболь Валерий Романович. Электродинамика криопроводников в условиях неоднородного магнитного поля и анизотропии рассеяния носителей заряда.

**Ключевые слова:** низкие температуры, нормальные металлы, оксидные сверхпроводники, сильное магнитное поле, неоднородность кинетических свойств, распределение токовой плотности, деформационные дефекты, сопротивление, джоулев разогрев, кипение хладагента.

**Объект исследования:** электронные кинетические явления в магнитном поле в нормальных некомпенсированных металлах и оксидных сверхпроводниках.

**Предмет исследования:** механизмы малоуглового рассеяния электронов проводимости, закономерности протекания постоянного тока в однослойных и двухслойных металлических структурах при неоднородности проводимости в магнитном поле, проявление нелинейной динамики носителей заряда в электрических свойствах, температурно-электрические домены при джоулевом разогреве.

**Цель работы:** установление закономерностей воздействия сильного, в том числе неоднородного, магнитного поля на низкотемпературные процессы переноса заряда и тепла в проводниках с металлическим типом проводимости.

Применены методы низкотемпературного эксперимента, включающие потенциометрию, магнитометрию, регистрацию поверхностного сопротивления. Физические модели явлений строились на основе количественного соответствия результатов эксперимента с расчетом и выполнения условий сходимости предлагаемых физических теорий к известным положениям при предельном переходе по исследуемому параметру.

Выявлены механизмы интерференционного влияния друг на друга анизотропной и изотропной составляющих в рассеянии электронов проводимости, приводящие к поведению сопротивления и термоэдс, неадекватному суммированию вероятностей рассеяния на точечных и протяженных дефектах.

Построена модель протекания постоянного электрического тока в проводниках геометрии Холла в неоднородном магнитном поле, учитывающая свойства материала и параметры магнитного поля.

В проводниках геометрии Корбино установлены уровни генерации магнитного поля азимутального дрейфа и выявлена связь этого поля с типом поверхности Ферми и чистотой материала.

В проводниках геометрии Холла и Корбино выявлена нелинейность вольт-амперных характеристик, обусловленная существованием стационарных температурно-электрических доменов.

Результаты могут быть применены для повышения эффективности устройств и систем криогенного электромашиностроения, использующих при функционировании накопление и преобразование энергии магнитного поля.

## РЭЗЮМЭ

Собаль Валерый Раманавіч. Электрадынаміка крыяправаднікоў ва ўмовах неаднароднага магнітнага поля і анізатрапіі рассеяння носьбітаў зараду.

**Ключавыя словы:** нізкія тэмпературы, нармальныя металы, аксідныя звышправаднікі, моцнае магнітнае поле, неаднароднасць кінетычных уласцівасцяў, размеркаванне токавай шчыльнасці, дэфармацыйныя дэфекты, супраціўленне, джоўлеў нагрэў, кіпенне хладагенту.

**Аб'ект даследавання:** электронныя кінетычныя з'явы ў магнітным полі ў нармальных некампенсаваных металах і аксідных звышправадніках.

**Прадмет даследавання:** механізмы малавуглавога рассеяння электронаў праводнасці, заканамернасці працякання пастаяннага току ў аднаслойных і двухслойных металічных структурах пры неаднароднасці праводнасці ў магнітным полі, праўленне нелінейнай дынамікі носьбітаў зараду ў электрычных уласцівасцях, тэмпературна-электрычныя дамены пры джоўлевым нагрэву.

**Мэта работы:** устанавіць заканамернасці ўздзеяння моцнага, ў тым ліку неаднароднага, магнітнага поля на нізкатэмпературныя працэсы пераносу зараду і цяпла ў правадніках з металічным тыпам праводнасці.

Прыменены метады нізкатэмпературнага эксперыменту, ўключаючы патэнцыяметрыю, магнітаметрыю, рэгістрацыю паверхневага супраціўлення. Фізічныя мадэлі з'яў будаваліся на аснове колькаснай адпаведнасці вынікаў эксперыменту з разлікам і выканання ўмоў сыходнасці прапанаваных фізічных тэорый да вядомых палажэнняў пры лімітавым пераходзе па даследаваным параметры.

Вывяўлены механізмы інтэрферэнцыйнага ўплыву анізатропнай і ізатропнай састаўляючых у рассеянні электронаў праводнасці, прыводзячых да паводзін супраціўлення і тэрмаэлектрарухаючай сілы, не адэкватных падсумоўванню імавернасцяў рассеяння на кропкавых і працяглых дэфектах.

Пабудавана мадэль працякання пастаяннага электрычнага току ў правадніках геаметрыі Хола ў неаднародным магнітным полі, якая ўлічвае ўласцівасці матэрыяла і параметры магнітнага поля.

У правадніках геаметрыі Карбіна ўстаноўлены ўзроўні генерацыі магнітнага поля азімутальнага дрэйфу і выяўлена сувязь гэтага поля з тыпам паверхні Фермі і чысціней матэрыялу.

У правадніках геаметрыі Хола і Карбіна выяўлена нелінейнасць вольт-амперных характарыстык, абумоўленая існаваннем стацыянарных тэмпературна-электрычных даменаў.

Вынікі даследаў магчыма прымяніць да павышэння эфектыўнасці прыстасаванняў і сістэм крыягеннага электрамашынабудавання, якія выкарыстоўваюць пры функцыяніраванні назапашванне і пераўтварэнне энергіі магнітнага поля.

## SUMMARY

Sobol Valery Romanovich. Electrodynamics of cryoconductors under conditions of an inhomogeneous magnetic field and anisotropy of scattering of the charge carriers.

Key words: low temperatures, normal metals, oxide superconductors, high magnetic field, inhomogeneity of kinetic properties, current density distribution, deformation defects, resistance, Joule heating, coolant boiling.

Object of research: electron kinetic phenomena under magnetic field in normal non-compensated metals and oxide superconductors.

Subject of research: mechanisms of small-angle scattering of electrons, regularities of steady current flow through single-layer and double-strip composite metal structures under inhomogeneity of conductivity in magnetic field, manifestation of non-linear dynamics of electrons in electric properties, temperature-electric domains at Joule heating.

Objective of work: to establish the regularities of an action of a high magnetic field including inhomogeneous that on low temperature processes of charge and heat transfer in conductors with metal type of conductivity.

Low temperature experimental methods including potentiometry, magnetometry, calorimetry, surface resistance registration are applied. Physical models of phenomena were under construction on the base of quantitative conformity of experimental results with calculations at the conditions of convergence of suggested physical theories to known positions at extreme transition on the researched parameter.

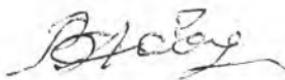
The electron scattering mechanisms of interference influence of anisotropic and isotropic constituents each other have been revealed. It has been established that these processes cause the behavior of resistance and thermoelectromotive force which is inadequate to summation of scattering probabilities on both point and extensive defects.

The model of steady current flow in Hall conductors in inhomogeneous magnetic field has been made. It takes into account the electron properties of material and the parameters of gradient magnetic field.

For the conductors of Corbino geometry the levels of generation of magnetic field due to the electron azimuth drift are established and the connection of parameters of this own magnetic field with the type of Fermi-surface and material purity are determined.

In the conductors of Hall and Corbino geometries the non-linearity of volt-ampere characteristics has been revealed as a consequence of the existence of steady temperature-electric domains.

The results may be applied to increase an efficiency of devices and apparatus of cryogenic electric machinery construction using at its functioning an accumulation and transformation of magnetic energy.



РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Подписано в печать 04.08.2005. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 3,0.  
Тираж 60 экз. Зак. 662.

Отпечатано с готового оригинала-макета заказчика  
в Республиканском унитарном предприятии  
«Издательский центр Белорусского государственного университета».  
ЛП № 02330/0056850 от 30.04.2004.  
220030, Минск, ул. Красноармейская, 6.