

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
им.Б.И.Веркина

На правах рукописи
УДК 539.21; 539.216

Каширин Владимир Юрьевич

РЕЛАКСАЦИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОНОВ
В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЕНКАХ ВИСМУТА

01.04.07 - Физика твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1995 г.



Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Физико – техническом институте
низких температур им. Б.И.Веркина
Национальной Академии Наук Украины.

Научный руководитель – доктор физико – математических наук,
профессор Ю.Ф.Комник

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук,
профессор Н.М.Макаров

доктор физико – математических наук,
вед. научн. сотрудник О.И.Шклярёвский

Ведущая организация – Харьковский Государственный Университет

Защита состоится " 4 " июля 1995 г. в 15 часов на
заседании Специализированного совета Д.02.35.02 при фи-
зико-техническом институте низких температур им. Б.И.Веркина
НАН Украины (310164, г.Харьков – 164, пр. Ленина, 47).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-
технического института низких температур им Б.И.Веркина НАН
Украины.

Автореферат разослан "2" июня 1995 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с подписью,
заверенной Гербовой печатью, просим направлять по адресу:
310164, г.Харьков – 164, пр. Ленина, 47, ФТИНТ НАН Украины,
ученому секретарю Специализированного совета Д 02.35.02

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико – математических наук

А.С.Ковалев

В настоящей работе осуществлено комплексное исследование квантовых интерференционных эффектов и эффекта электронного перегрева в тонких пленках висмута с целью получения сведений о временах релаксации фазы и спина электронов, параметрах межэлектронного взаимодействия.

Актуальность темы диссертации. Теоретические исследования последних лет показали, что в неупорядоченных металлических системах основные механизмы неупругой релаксации электронов - электрон-электронное и электрон-фононное рассеяние - при низких температурах существенно модифицируются. Так в неупорядоченных металлах обратное время электрон-электронного взаимодействия описывается зависимостью $\tau_{ee}^{-1} \propto \epsilon^{d/2}$ (d - размерность системы), а не зависимостью $\tau_{ee}^{-1} \propto \epsilon^2$, характерной для чистого металла. Температурная зависимость времени электрон-фононного взаимодействия в неупорядоченном металле также изменяется. Вместо известной зависимости $\tau_{eph}^{-1} \propto T^3$ в условиях, когда вследствие малости длины свободного пробега электронов l по сравнению с длиной волны фонона при низких температурах возникает неравенство $q_{ph}l < 1$ (q_{ph} - волновой вектор теплового фонона), электрон-фононное взаимодействие ослабляется и должна появиться зависимость $\tau_{eph}^{-1} \propto lT^4$.

С другой стороны, в современной электронике с развитием технологии получения субмикронных структур все большее применение стали находить элементы нанoeлектроники. Оценка возможностей элементов нанoeлектроники (например, их быстродействия и т.п.) требует знания характерных релаксационных времен для электронов, в частности времени электрон-фононной энергетической релаксации. Такую информацию можно получить из эффекта электронного перегрева в тонких пленках, так как передача избыточной энергии электронов, приобретенной в электрическом поле, в фононную систему определяется временем τ_{eph} электрон-фононной энергетической релаксации.

Данные о времени неупругой релаксации электронов можно получить также при изучении квантовых поправок к проводимости, обусловленных эффектами слабой локализации электронов (СЛ) и электрон-электронного взаимодействия (ЭЭВ) в неупорядоченных металлических системах. Они дают информацию о времени τ_{φ} релаксации фазы волновой функции электронов (по существу,

времени неупругой релаксации), а также о времени релаксации спина электрона при спин-орбитальном (τ_{so}) и спин-спиновом (τ_s) рассеянии, о константах межэлектронного взаимодействия.

Цель данного исследования: получение информации о характерных временах неупругой релаксации электронов в тонких пленках висмута и их температурном изменении в области низких температур. Для этого решались следующие задачи:

1. Изучение проявления квантовых интерференционных эффектов (СЛ и ЭЭВ) в пленках различной толщины, степени разупорядочения и при различных температурах. Получение информации о температурном изменении времени релаксации фазы волновой функции электронов.

2. Изучение изменения величины квантовых поправок к проводимости пленок, связанных с эффектом СЛ и ЭЭВ, под влиянием протекания тока высокой плотности. Получение из эффекта электронного перегрева сведений о температурной зависимости времени электрон-фононной энергетической релаксации.

3. Выяснение вопроса о непосредственном влиянии сильного электрического поля на величину квантовых поправок к проводимости, связанных с эффектами СЛ и ЭЭВ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Температурное изменение времени электрон-фононной релаксации τ_{eph} в тонких поликристаллических пленках Ві при низких температурах характеризуется зависимостью $\tau_{eph} \propto T^{-3}$;

2. В области сверхнизких температур, а также в пленках Ві с высокой степенью разупорядочения при гелиевых температурах проявляется зависимость $\tau_{eph} \propto T^{-4}$, отвечающая "грязному" пределу;

3. Магнитосопротивление пленок Ві малой толщины при низких температурах успешно описывается локализационной квантовой поправкой, но при протекании тока высокой плотности появляется вклад квантовой поправки, связанной с ЭЭВ (кулоновская поправка);

4. Локализационная поправка к температурной зависимости проводимости пленок Ві не изменяется в сильном электрическом поле (по крайней мере до ~ 20 В/см); кулоновская поправка к температурной зависимости проводимости чувствительна к сильному электрическому полю, что свидетельствует о его влиянии на характер электрон-электронного взаимодействия.

Все перечисленные результаты получены впервые, что определяет научную новизну работы.

Научное и практическое значение диссертационной работы. В настоящей работе определена температурная зависимость времени электрон-фононного взаимодействия в пленках В1 (вида T^{-3}) и показано, что наблюдаемая для времени фазовой релаксации зависимость T^{-2} формируется при участии процессов как электрон-электронной, так и электрон-фононной релаксации. В работе впервые экспериментально обнаружена предсказанная в теории зависимость вида T^{-4} для времени электрон-фононного рассеяния в "грязном" пределе. Разработана методика разделения вклада эффектов СЛ и ЭВ в температурную зависимость проводимости, что позволило выявить влияние сильного электрического поля на межэлектронное взаимодействие в висмуте.

Апробация работы. Результаты настоящей работы докладывались на следующих конференциях, совещаниях и семинарах: Международной конференции "Высокотемпературная сверхпроводимость и локализационные явления" (г.Москва, 1991 г.); 13^й и 14^й Всеобщих конференциях отделения конденсированного состояния Европейского физического общества (Германия, г.Регенсбург, 1993 г.; Испания, г.Мадрид, 1994 г.); XX Международной конференции по физике низких температур (LT-20) (США, г.Юджин, 1993 г.); Международной конференции "Переход металл-изолятор, локализация и мезоскопические системы" (США, г.Юджин, 1993 г.); 29^й и 30^й Совещаниях по физике низких температур (г.Казань, 1992 г.; г.Дубна, 1994 г.); Международной конференции "Физика в Украине" (г.Киев, 1993 г.); Международной конференции по физике и технологии тонких пленок (г.Ивано-Франковск, 1993 г.); VII Всесоюзном семинаре по низкотемпературной физике металлов (ДОНФИ НАНУ, г.Кр.Лиман, 1991 г.); 8^й Международном семинаре по низкотемпературной физике твердого тела (Крым, п.Ласпи, 1993 г.).

ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты диссертации опубликованы в II печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 119 наименований. Полный объем работы составляет 153 страницы, включая 34 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы проведенных исследований, указаны цели и задачи исследований, дана кратко информация об объекте исследований, описана структура диссертации. Приведены основные положения, выносимые на защиту. Представлен список основных конференций, совещаний и семинаров, на которых докладывались результаты настоящей работы, а также список опубликованных работ по теме диссертации.

В первой главе представлен обзор литературы теоретического и экспериментального исследования квантовых интерференционных эффектов – СЛ и ЭЭВ, которые приводят к возникновению квантовых поправок к проводимости в неупорядоченных системах при низких температурах. Приведены основные теоретические выражения для изменения квантовых поправок к проводимости систем различной размерности в функции температуры и напряженности магнитного поля. Представлена информация о результатах основных теоретических работ, посвященных проблеме характерных времен релаксации электронов в неупорядоченных металлах. Дан краткий обзор наиболее важных экспериментальных работ, выполненных в области изучения квантовых интерференционных эффектов. Указаны существующие на настоящий момент времени проблемы в интерпретации экспериментальных результатов. Отражена дискуссионная проблема влияния сильных электрических полей на квантовые интерференционные эффекты.

Во второй главе дан обзор результатов теоретического исследования эффекта электронного перегрева в металлах. Указаны условия его реализации, а также приведены основные теоретические выражения, на основе которых в настоящей работе была получена информация о времени электрон-фононной энергетической релаксации. В этой главе также представлен обзор экспериментальных работ, в которых исследовался эффект электронного перегрева в тонких пленках металлов.

В третьей главе описана методика приготовления тонких пленок В1, результаты структурного исследования полученных образцов. Особое внимание уделено условиям реализации эффекта электронного перегрева, в связи с чем, обсуждается вопрос о выборе подложки для экспериментов по электронному перегреву. В этой главе описаны возможности и параметры экспериментальных установок, использованных для проведения гальваномагнит-

ных исследований, а также методика измерений.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты выполненного комплексного исследования квантовых интерференционных эффектов [1] и эффекта электронного перегрева [2] в тонких пленках В1 с целью получения сведений о температурной зависимости времени электрон-фононной релаксации электронов в "чистом" ($q_{ph} > 1$) и "грязном" ($q_{ph} < 1$) пределах.

На основании экспериментальных данных для температурного и магнитополевого изменения сопротивления большого числа изученных образцов различной толщины получены температурные зависимости квантовых поправок к проводимости пленок В1 и температурные зависимости времени τ_{ϕ} фазовой релаксации электронов при различных значениях тока.

Уменьшение величины квантовых поправок к проводимости пленок с ростом тока обусловлено прежде всего разогретыми эффектами. При пропускании достаточно сильного тока температура электронов повышается. Передача избыточной энергии от электронной к фононной системе осуществляется посредством процессов электрон-фононного взаимодействия. В условиях обеспечивающих стационарность температуры решетки (благодаря теплоотводу в подложку или среду), температура электронов T_e устанавливается выше начальной фононной температуры T_{ph} [3]:

$$(kT_e)^2 = (kT_{ph})^2 + \frac{6}{\pi} (eE)^2 D \tau_{eph} \quad (1)$$

где $D = v_F^2 \tau / 3$ - коэффициент диффузии электронов.

Это соотношение может быть использовано для определения времени τ_{eph} электрон-фононной энергетической релаксации. Режим электронного перегрева, при котором повышение T_e контролируется временем τ_{eph} , возможен при высокой акустической прозрачности границ металла и подложки. В настоящей работе впервые в практике реализации эффекта электронного перегрева применена подложка (кальцит), дающая хорошую акустическую связь с исследуемой пленкой висмута.

Для определения T_e использовались в качестве "электронных термометров" квантовые поправки. Для этого анализировались температурные зависимости суммарной поправки, включающей локализационную и кулоновскую поправки (при измерениях в нулевом магнитном поле), либо температурные зависимости кулоновской поправки (при измерениях в магнитном поле). Дальнейшие расчеты τ_{eph} из (1) выявили однотипную функциональную зави-

симость $\tau_{\text{epH}}^{-1} \propto T^p$, где $p \approx 3$, причем это значение p воспроизводится для различных токовых режимов.

Впервые для определения T_e в качестве еще одного "электронного термометра" использованы сведения о температурном изменении времени τ_ϕ фазовой релаксации электронов, рассчитываемого из локализационной поправки к магнитопроводимости пленок при различных токах и температурах.

На рис. 1 темными точками внизу представлены типичные зависимости температурного изменения времени τ_ϕ для тонкой пленки висмута на кальците при различных токах. Для нахождения τ_ϕ из кривых магнитосопротивления (МС) мы использовали процедуру компьютерной подгонки экспериментальных кривых и теоретического выражения для магнитополевой зависимости локализационной поправки $\Delta\sigma_{\text{H}}^{\text{L}} = f(\text{H}, D, \tau_\phi, \tau_{\text{SO}})$ [1]. Кривая 1 изображает зависимость $\tau_\phi(T)$, отвечающую равновесному режиму. Кривые 2-6 изображают зависимости $\tau_\phi(T)$ при различных греющих токах. На равновесной кривой $\tau_\phi(T)$ видны температурные области, в которых проявляются хорошо выраженные зависимости $\tau_\phi^{-1} \propto T$ и $\tau_\phi^{-1} \propto T^2$. Появление первой из них связано с определяющим вкладом электрон-электронных процессов рассеяния, а второй - с включением процессов электрон-фононного рассеяния.

Для определения T_e величина τ_ϕ при сильном токе отождествлялась с такой же величиной τ_ϕ при слабом токе. Светлыми точками в верхней части рис. 1 изображены температурные зависимости времени τ_{epH} , полученные с помощью уравнения (1). Видно, что полученные значения времени τ_{epH} вполне хорошо описываются единой для всех токовых режимов функциональной зависимостью $\tau_{\text{epH}}^{-1} \propto T^p$ (где $p \approx 3$), изображенной на рисунке пунктирной прямой. Темными точками в верхней части рис. 1 изображена температурная зависимость времени τ_{epH}^1 , отвечающего электрон-фононному вкладу в фазовую релаксацию за счет неупругих процессов. Времена τ_{epH} и τ_{epH}^1 , как показано в [3], находятся в случае $p=3$ в простом соотношении $\tau_{\text{epH}} / \tau_{\text{epH}}^1 \approx 0,4$, которое оказалось выполненным в проведенных расчетах τ_{epH}^1 .

В работе проанализирован вклад электрон-электронного и электрон-фононного процессов релаксации в фазовую релаксацию с помощью представления равновесной кривой $\tau_\phi(T)$ в широком интервале температур функцией вида

$$(\tau_{\varphi})^{-1} = (\tau_{ee})^{-1} + (\tau_{eph}^1)^{-1} = AT + A_p T^p \quad (2)$$

и выполнения компьютерного расчета параметров A , A_p и p . Результаты такого анализа для образца на рис.1 изображены штрих-пунктирными прямыми. Величина p для всех изученных образцов оказалась примерно равна 3, а составляющая τ_{ee}^{-1} численно близка к теоретическому значению согласно [1] (обозначена на рис.1 как τ_{ee}^{AA}). Следовательно, наблюдаемая при 4 - 10 К зависимость $\tau_{\varphi}^{-1} \propto T^2$ формируется при участии процессов как электрон-электронной, так и электрон-фононной релаксации.

Таким образом, анализ зависимости $\tau_{\varphi}(T)$, полученной из эффекта СЛ, согласуется с зависимостью $\tau_{eph}(T)$, найденной с помощью эффекта электронного перегрева в области температур, где $\tau_{ee} < \tau_{eph}$. Найденную зависимость $\tau_{eph}^{-1} \propto T^3$ следует трактовать, как проявление процессов электрон-фононного рассеяния в трехмерном случае в условиях $q_{ph}l > 1$. Действительно, для представленного на рис.1 образца, оценка температуры

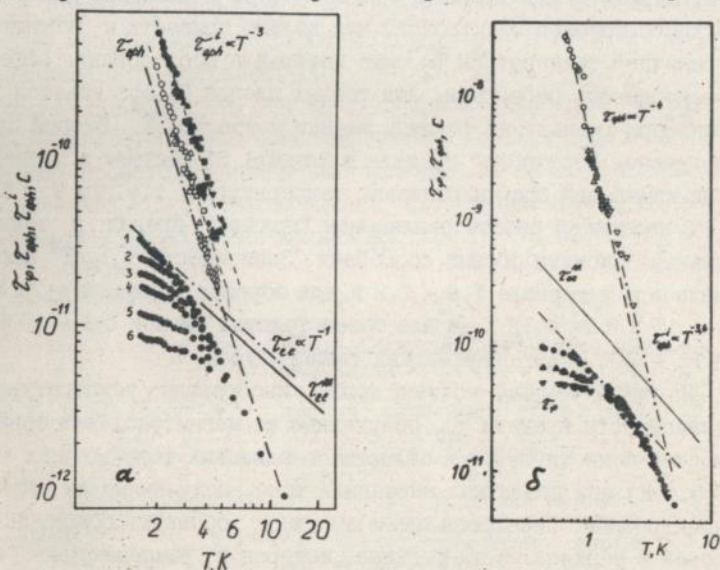


Рис.1. Зависимости τ_{φ} , τ_{eph} , τ_{ee}^1 (T) для пленки висмута ($L = 99 \text{ \AA}$) на кальците при различных значениях тока, мкА (эл. поля, В/см): 1 ● - 5 (0,53); 2 ●, ○, ● - 30 (3,27); 3 ●, △, ▲ - 60 (6,55); 4 ●, □, ■ - 100 (10,93); 5 ●, ▽, ▽ - 200 (21,87); 6 ●, ◇, ◆ - 300 (32,81).

Рис.2. Зависимости τ_{φ} , τ_{eph} (T) для пленки висмута ($L = 92 \text{ \AA}$) на кальците при различных значениях тока, мкА (эл. поля, В/см): ●, ○ - 1 (0,07); ▲, △ - 5 (0,35); ▽, ▽ - 10 (0,69).

$T_2 = \hbar s_{1,t} / kT$, ниже которой осуществляется переход от "чистого" к "грязному" пределу для средней длины свободного пробега электронов. $l \sim 130 \text{ \AA}$ дает значения 1,27 и 0,64 К (соответственно для скорости $s_{1,t}$ продольных и поперечных фононов) т.е. исследованный интервал температур определения τ_{eph} лежит выше T_2 . Это подтверждается также отсутствием, как установлено, явной зависимости τ_{eph} от l .

Появление зависимости $\tau_{\text{eph}}^{-1} \propto T^3$ для пленок висмута является следствием, с одной стороны, изотропизацией электронных кинетических характеристик в плоскости пленки благодаря поликристаллическому строению и существованию аксиальной текстуры; а, с другой стороны, результатами хорошей акустической связи пленки с подложкой, препятствующей двумеризации фононного спектра в пленке.

Представляло интерес реализовать условия "грязного" предела и получить соответствующие температурные зависимости времени τ_{eph} . Существуют две экспериментальные возможности реализовать "грязный" предел для изучаемых тонких пленок висмута. Первый путь состоит в искусственном уменьшении длины свободного пробега электронов, что должно привести к повышению граничной температуры T_2 выше интервала исследования эффекта электронного перегрева. Для тонких пленок В1 это удается достичь при уменьшении толщины пленки менее 100 \AA . Второй путь получения "грязного" предела в пленках В1 состоит в проведении измерений при сверхнизких температурах, т.е. при $T < T_2$.

В настоящей работе реализован "грязный" предел в тонких пленках висмута обоими способами. Зависимость $\tau_{\text{eph}}^{-1} \propto T^4$ наблюдалась в интервале 1,6 - 2,2 К для образца толщиной $\sim 74 \text{ \AA}$ с $l \sim 15 \text{ \AA}$ и $T_2^1 \sim 12 \text{ К}$, а для более толстых пленок с $l \sim 100 \text{ \AA}$ и $T_2^1 \sim 2 \text{ К}$ - при сверхнизких температурах.

На рис.2 темными точками внизу изображены температурные зависимости времени τ_{ϕ} , полученные из магнитопольных зависимостей сопротивления в области сверхнизких температур (0,38 - 5,0 К) при различных значениях тока. Полученные из эффекта электронного перегрева значения τ_{eph} образуют совокупность точек в верхней части рисунка, которая в температурном интервале 0,6-1,2 К хорошо описывается зависимостью $\tau_{\text{eph}}^{-1} \propto T^4$.

Таким образом, в настоящей работе впервые экспериментально обнаружено предсказанное в теории ослабление электрон-фо-

нонного взаимодействия для так называемого "грязного" предела, когда длина свободного пробега электронов оказывается меньше длины волны теплового фона.

В пятой главе изложены результаты изучения влияния сильного электрического поля на магнитополевые и температурные зависимости квантовых поправок к проводимости тонких пленок висмута, связанных со СЛ и ЭЭВ.

При исследовании эффекта электронного перегрева мы обнаружили, что значительное увеличение тока через образец приводит к заметной трансформации кривых МС. На рис.3 в качестве примера представлены кривые МС (изображенные на рис.3 зависимости $-\Delta\sigma(H)$ отражают вид кривых МС, поскольку для малых поправок справедливо $-\Delta\sigma = \Delta R/R R_{\square}$, R_{\square} — сопротивление квадратного участка пленки, и поэтому допустимо равнозначное использование терминов МС и МП) для пленки В1 на кальците при температуре $T = 4,2$ К и различных токах. Видно, что с ростом тока на кривых МС появляется максимум, который сдвигается в сторону меньших магнитных полей по мере роста тока, и далее возникает отрицательное МС.

Было установлено, что основной причиной изменения формы кривых МС является повышение температуры пленки. В результате нагрева происходит уменьшение значений τ_{φ} и их приближение к значению τ_{SO} , что согласно [1] должно приводить к наблюдаемой трансформации кривых МС.

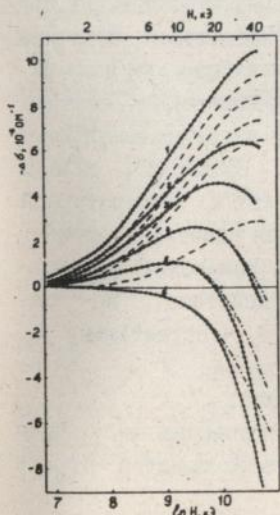


Рис.3. Зависимости $\Delta\sigma(H)$ для пленки висмута ($L = 74 \text{ \AA}$) на кальците при $T = 4,2$ К и различных значениях тока, мкА (эл. поля, В/см): 1- 10 (0,17), 2- 600 (11), 3- 1000 (18), 4- 1600 (29), 5 - 2480 (45), 6 - 3100 (60). Точечные кривые — экспериментальные зависимости; штрих-пунктирные кривые построены согласно $\Delta\sigma_{H=0}^L = I(H, D, \tau_{\varphi}, \tau_{SO})$ [1]; пунктирные кривые σ_{SO}^L согласно $\Delta\sigma_{H=0}^L$ при выполнении условия $\tau_{H=0} = \text{const}$; сплошные кривые σ_{SO}^L получены из суммы локализационной и кулоновской поправки.

Однако, анализ показал, что полностью изменение формы кривых МС во всем интервале магнитных полей и токов не удается объяснить указанной причиной; согласие с формулами для локализационной поправки d' стигается лишь до максимума. Кроме того, получаемые при этом значения τ_{SO} систематически растут (почти на порядок величины) с увеличением тока. В то же время, если находить τ_{SO} при разных температурах при малом токе, то τ_{SO} от температуры не зависят, как и должно быть. Расчет магнитопольевых зависимостей при разных токах при условии сохранения постоянства τ_{SO} дает результат, представленный на рис.3 пунктирными линиями. Сильное расхождение между экспериментальными и расчетными кривыми свидетельствует о существовании дополнительной компоненты МС, отрицательной по знаку и возрастающей под влиянием тока.

Оказалось, что точное описание изменения формы кривых МС пленок висмута при сильных токах во всем интервале магнитных полей достигается, если в дополнение к локализационной поправке учесть кулоновскую поправку в диффузионном или куперовском канале. Правомерность учета этих поправок в висмуте связана с относительно большим значением g -фактора ($g = 17$ для электронов и $g = 134$ для дырок при $H \parallel C_3$), и близостью висмута к реализации сверхпроводящего состояния.

Оба варианта учета кулоновской поправки приводят к одинаковому нетривиальному результату: во-первых, константы взаимодействия λ_N^D и λ_N^C являются отрицательными, что отвечает притяжению между электронами; во-вторых: абсолютная величина этих констант взаимодействия растет с электрическим полем.

Полученные результаты потребовали независимого способа проверки сделанного заключения о влиянии энергии электронов в висмуте на характер их взаимодействия. Помимо МС, вклады СИ и ЭЭВ присутствуют в квантовых поправках к температурной зависимости проводимости. Соответствующая константа взаимодействия λ_T^D , определяющая температурное изменение кулоновской поправки (диффузионный канал взаимодействия), не тождественна λ_N^D , но она также должна быть чувствительна к энергии электронов.

Поставленная задача решалась в три этапа:

1). Нахождение зависимости $D\tau_{eph}(T)$ - осуществлено, как в гл. IV, на основе анализа изменения вида зависимостей $D\tau_{\varphi}(T)$

под влиянием электронного перегрева.

2). Разделение вкладов эффектов СИ и ЭЭВ в суммарную квантовую поправку к температурной зависимости проводимости пленок В1 – реализовано путем сравнения температурного изменения проводимости пленок в отсутствии магнитного поля и в сильном магнитном поле. Другим независимым приемом определения вида локализационной поправки является ее расчет на основании данных для $\Delta\sigma_{\phi}$.

3). Выделение влияния повышения температуры электронов на каждую из квантовых поправок – осуществлено с помощью соотношения (I) по известной температурной зависимости $\Delta\sigma_{\phi}$.

На рис. 4а,б точками изображены экспериментальные данные для температурных зависимостей локализационной поправки $\Delta\sigma_{\text{T}}^{\text{L}}$ (а) и кулоновской поправки $\Delta\sigma_{\text{T}}^{\text{D}}$ (б), полученные при различных токах. Сплошные кривые изображают ожидаемое изменение квантовых поправок под влиянием электронного перегрева. Видно, что в случае локализационной поправки непосредственное влияние электрического поля на $\Delta\sigma_{\text{T}}^{\text{L}}$ не обнаруживается (отклонение экспериментальных точек от расчетных кривых при токах 400 и 500 мкА связано с нарушением условий реализации эффекта электронного перегрева). В случае же кулоновской поправки наблюдается расхождение расчетных и экспериментальных кривых, усиливающееся с ростом тока, что свидетельствует об изменении константы взаимодействия $\lambda_{\text{T}}^{\text{D}}$ с ростом электрического

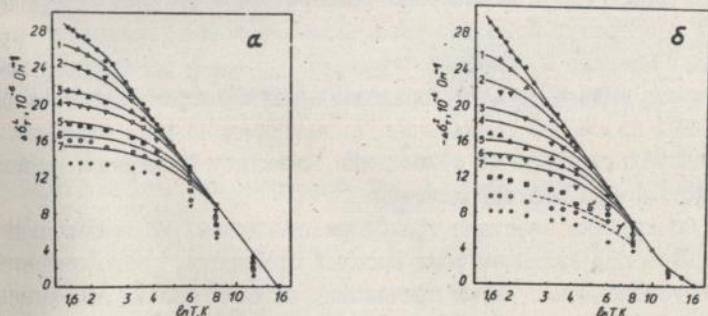


Рис. 4. Зависимости $\Delta\sigma_{\text{T}}^{\text{L}}(T)$ (а) и $\Delta\sigma_{\text{T}}^{\text{D}}(T)$ (б) для пленки висмута ($L = 125 \text{ \AA}$) при различных значениях тока, мкА (эл. поля В/см): ● - 10 (0,6), Δ - 40 (2,4), ▽ - 80 (4,8), ▲ - 150 (9,0), ▾ - 200 (12,0), ■ - 300 (18,0), ○ - 400 (24,0), * - 500 (30,0). Пунктирные кривые изображают вид зависимостей $\Delta\sigma_{\text{T}}^{\text{D}}$ для токов 400 и 500 мкА после исключения вклада джоулева нагрева.

поля. Следовательно, обнаруженный для поведения МС эффект нашел подтверждение и в данном случае. Различие характера изменения $\lambda_{\text{H}}^{\text{D}}$ и $\lambda_{\text{T}}^{\text{D}}$ с электрическим полем ($\lambda_{\text{H}}^{\text{D}}$ - растет, а $\lambda_{\text{T}}^{\text{D}}$ - уменьшается) объясняется тем, что они образуются суммированием различных процессов взаимодействия, дающих составляющие с разными знаками. В частности, в эти константы входит составляющая $\lambda_{\text{ph}}^{\text{ee}}$, учитывающая механизм межэлектронного взаимодействия, связанный с обменом виртуальными фононами. Предполагается, что именно эта составляющая подвержена влиянию электрического поля в результате доплеровского сдвига частоты виртуальных фононов в условиях дрейфа в электрическом поле.

В заключении изложены основные результаты и выводы работы:

1. Установлено, что время электрон-фононной энергетической релаксации в пленках висмута в типичных случаях описывается законом $\tau_{\text{erh}}^{-1} \propto T^3$. Показано, что такая же функция присутствует в температурной зависимости времени неупругой релаксации электронов, получаемой из эффекта слабой локализации электронов, при выделении вкладов процессов электрон-электронного и электрон-фононного рассеяния. Указанная зависимость идентифицирована как реализация "чистого" предела в 3D случае электрон-фононного взаимодействия.
2. Показано, что с уменьшением длины свободного пробега электронов или с понижением температуры в область сверхнизких температур возможно реализовать условия "грязного" предела. Впервые в условиях "грязного" предела обнаружена зависимость вида $\tau_{\text{erh}}^{-1} \propto T^4$, предсказанная в теории электрон-фононных процессов релаксации в неупорядоченных металлах и свидетельствующая об ослаблении электрон-фононного взаимодействия при разупорядочении.
3. Обнаружена заметная трансформация кривых МС тонких пленок висмута под влиянием тока высокой плотности, обусловленная, как установлено, двумя причинами: а) изменением локализационной поправки под влиянием нагрева и сближения значений времен фазовой и спин-орбитальной релаксации и б) появлением вклада кулоновской поправки, увеличивающейся с ростом тока.
5. Изучено поведение квантовых поправок к температурной зависимости проводимости пленок висмута под влиянием тока высо-

кой плотности с целью выяснения вопроса, испытывают ли эффекты слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия влияние сильного электрического поля. Развита новая методика разделения квантовых поправок, связанных с эффектами слабой локализации электронов и с электрон-электронным взаимодействием. Установлено, что непосредственное влияние электрического поля на локализационную поправку (по крайней мере до $E \sim 20$ В/см) не проявляется; кулоновская поправка в этих условиях демонстрирует чувствительность к электрическому полю.

Список литературы, цитированной в автореферате:

1. B. L. Altshuler, A. G. Aronov, M. E. Gershenzon, and Yu. V. Sharvin, *Sov. Sci. Rev. A.*, v. 9, p. 223 (1987).
2. V. A. Shklovskii, *J. Low Temp. Phys.* **41**, 375 (1980).
3. G. Bergmann et al. *Phys. Rev. B.* **41**, 7386 (1990).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. E. I. Bukhshtab and V. Yu. Kashirin. Weak localization and overheating effects in the conductivity of semimetal thin films. - *Progress in High Temperature Superconductivity*, (Singapore, World Scientific) **32**, pp. 65 - 71 (1992).
2. В. Ю. Каширин, Ю. Ф. Комник, Эффекты слабой локализации и взаимодействия электронов в пленках висмута в сильном электрическом поле. - *ФНТ*, **19**, N2, сс. 165 - 175 (1993).
3. В. Ю. Каширин, Ю. Ф. Комник, Электрон-фононное рассеяние в тонких пленках висмута. - *ФНТ*, **19**, N4, сс. 410-417 (1993).
4. Yu. F. Komnik and V. Yu. Kashirin, Quantum interference and heating effects in Bi thin films. - *Proceed. contributed papers International Conf. "Physics in the Ukraine"*, Kiev, *Low Temp. Phys.*, pp. 129 - 132 (1993).
5. Ю. Ф. Комник, В. Ю. Каширин, Время неупругой релаксации электронов в тонких пленках висмута. - *ФНТ*, **19**, N8, сс. 908 - 916 (1993).
6. Ю. Ф. Комник, В. Ю. Каширин, Б. И. Белевцев, Е. Ю. Беляев, Время неупругой релаксации электронов в неупорядоченных пленках висмута. "Грязный" предел. - *ФНТ*, **20**, N2, сс. 158-166 (1994).
7. V. Yu. Kashirin and Yu. F. Komnik, Electron-phonon interaction in bismuth thin films. - *Physica B*, **194-196**, pp. 1121-1122 (1994).
8. В. Ю. Каширин, Ю. Ф. Комник, Квантовые поправки к температурной зависимости проводимости пленок висмута в сильном электрическом поле. I. Локализационная поправка. - *ФНТ*, **20**, N11, сс. 1148-1157 (1994).
9. Yu. F. Komnik, V. Yu. Kashirin, B. I. Belevtsev, E. Yu. Belyaev, Temperature variation of the time of inelastic electron relaxation in disordered bismuth films. - *Phys. Rev. B.* **50**, N20, pp. 15298-15303 (1994).
10. Ю. Ф. Комник, В. Ю. Каширин, Квантовые поправки к температурной зависимости проводимости пленок висмута в сильном электрическом поле. II. Кулоновская поправка. - *ФНТ*, **20**, N12, сс. 1256-1262 (1994).
11. V. Yu. Kashirin and Yu. F. Komnik, Electron-electron interaction in thin bismuth films. - *Phys. Rev. B.* **50**, N23, pp. 16845-16850 (1994).

453270

Kashirin V. Yu. "Electron relaxation and interaction in disordered bismuth films".

The thesis for obtaining the Candidate degree of science, physics and mathematics, speciality 01.04.07 - Solid State Physics, B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, Kharkov, Ukraine, 1995.

The low temperature effects of quantum interference (weak electron localization and electron-electron interaction) and electron overheating in thin Bi films ($\sim 100 \text{ \AA}$) are studied to derive information about the temperature dependences of the times of the electron-phonon (τ_{ep}) and electron-electron (τ_{ee}) relaxation and about the electron interaction parameters. It is found that $\tau_{ep}^{-1} \propto T^p$ for the objects studied, p being typically equal to 3. For the first time the dependence $\tau_{ee}^{-1} \propto T^4$ has been observed experimentally in the ultralow temperature region. This corresponds to the "dirty" limit. The quantum correction to the conductivity related to the electron-electron interaction is found to vary due to the influence of the electric field.

Каширін В. Ю. "Релаксація та взаємодія електронів в неупорядкованих плівках вісмуту".

Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла, фізико-технічний інститут низьких температур, Харків, 1995.

Досліджено прояв квантових інтерференційних ефектів (слабкої локалізації електронів та електрон-електронної взаємодії) і ефекту електронного перегріву в тонких плівках вісмуту (товщиною $\sim 100 \text{ \AA}$) при низьких температурах з метою отримання відомостей про температурні залежності часів електрон-фононної (τ_{ep}) і електрон-електронної (τ_{ee}) релаксації, параметри міжелектронної взаємодії.

Встановлено, що для вивчених об'єктів $\tau_{ep}^{-1} \propto T^p$ з характерним значенням $p = 3$; вперше експериментально виявлена залежність $\tau_{ee}^{-1} \propto T^4$ в області наднизьких температур, що відповідає "брудній" межі. Встановлено, що квантова поправка до провідності, яка пов'язана з електрон-електронною взаємодією, змінюється під впливом електричного поля.

Ответственный за выпуск канд. физ.-мат. наук Андриевский В.В.

подписано к печати 18.05 - 1995г. физ. п.л. I
Уч. - изд. л. I заказ N 24, тираж 100 экз.

Ротапринт ФТИИТ НАН Украины, 310164, Харьков-164,
пр. Ленина, 47