

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт физики твердого тела
Российской академии наук (ИФТТ РАН)
Чл.-корр. РАН, профессор

В.В.Кведер

2015 г.



Отзыв ведущей организации

на диссертацию Григорьева Павла Дмитриевича

«Особенности магнитосопротивления в слоистых квазидвумерных проводниках»
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.02 - теоретическая физика

Большое число современных проводящих материалов: высокотемпературные сверхпроводники, органические металлы, гетероструктуры и многие другие - многослойны и сильно анизотропны. Для их изучения используются разные методики: специально чувствительные к поверхностным свойствам образцов (фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES), сканирующая туннельная спектроскопия), или более естественная для массивных задач магнитная спектроскопия слоистых сред. Речь идет о деталях магнитных квантовых осцилляций и угловой зависимости магнетосопротивления с целью определения деталей электронной структуры таких металлов. Традиционный источник магнитных осцилляций в однородных металлах за счет разницы в «магнитном» поведении уровней Ландау и положения уровня Ферми пополняется здесь «модуляционной» составляющей в связи с периодической модуляцией параметров задачи. В известных аналогах, например, при снятии вырождения электронного спектра в магнитном поле периодическим возмущением однородности электронной плотности, дополнительные осцилляции можно наблюдать, меняя отношение между размерами циклотронной орбиты и периодом возмущения однородности электронной плотности. В слоистых средах картина сложнее, требуя специального внимания. Дополнительно имеются свидетельства влияния корреляционных явлений (волны зарядовой или спиновой плотности) на электронные свойства слоистых сред в магнитном поле. Единообразное, согласованное рассмотрение совокупности обозначенных проблем магнитотранспорта слоистых сред в тесной связи с имеющимися экспериментами содержится в работах Григорьева Павла Дмитриевича. **Актуальная** деятельность содержит объяснение качественно важным эффектам в магнитопроводимости квазидвумерных слоистых проводников. Основные из полученных результатов составили содержание его диссертации.

Общее **Введение** содержит описание основных электронных свойств квазидвумерных металлов, сведения о стандартной теории магнетосопротивления в них и современное положение дел в освоении конкретных задач физики анизотропных

проводников. Кроме того, каждая из глав сопровождается дополнительной вводной информацией, помогающей в ориентации с литературой.

В **первой** главе диссертации детально обсуждаются свойства монотонной части продольного межслоевого магнетосопротивления в различных по внешним параметрам предельных случаях. Известно, что в изотропной теории металлов с использованием кинетики в тау-приближении продольное магнетосопротивление отсутствует. Для сильно-анизотропных слоистых проводниках в квантующем магнитном поле это не так. Здесь отсутствует транспорт с временем рассеяния, независимым от энергии. Это обстоятельство порождает ряд следствий в поведении магнитопроводимости квазидвумерных слоистых металлов. Как впервые показано диссертантом, когерентному межслоевому электронному переносу в слоистых средах присуще сильное продольное межслоевое магнетосопротивление. Детали его поведения определяются отношениями трех параметров: расстоянием между уровнями Ландау, межслоевым интегралом перескока и уширением уровней из-за рассеяния на точечных примесях. В сильном магнитном поле, когда расстояние между уровнями Ландау больше межслоевого интеграла перескока и уширения уровней, магнетосопротивление описывается корневой зависимостью от магнитного поля. В обратном предельном случае эта зависимость оказывается слабой. А в промежуточном интервале полей возможно его линейное поведение.

Более ранние попытки выйти за пределы тау-приближения и определить свойства монотонной части продольного межслоевого магнетосопротивления, а также угловых и квантовых осцилляций магнетосопротивления в квазидвумерных металлах с помощью диаграммной техники Фейнмана, не давали этого эффекта, поскольку использовали независимую от энергии и магнитного поля или вычисленную в борновском приближении собственно-энергетическую часть электронной функции Грина, что для сильно анизотропных металлов в достаточно сильном магнитном поле не корректно.

Совокупность результатов этой главы поддерживается наблюдениями сильного продольного межслоевого магнетосопротивления в различных слоистых металлах, включая ожидаемые нюансы асимптотик проводимости для относительно чистых и грязных образцов.

Во **второй** главе диссертации излагается теория магнитных квантовых осцилляций (МКО) магнитопроводимости в сильно анизотропных квазидвумерных слоистых металлах с ожиданиями развития дополнительных «колебаний» размерного происхождения. Формально их наличие обнаруживается при варьировании отношения между циклотронной частотой и временем перескока между соседними слоями. В отличие от более ранних исследований данное рассмотрение справедливо в широком интервале изменения этих параметров. В условиях, когда интеграл межслоевого перескока электронов становится порядка или более расстояния между уровнями Ландау в расчетах появляются так называемые, медленные осцилляции магнетосопротивления и сдвиг фазы биений МКО. В отличие от МКО, медленные осцилляции возникают не из-за дополнительных малых «карманов» поверхности Ферми, а в меру ее гофрировки. Их частота имеет немонотонную угловую зависимость, а температурное затухание амплитуды медленных осцилляций определяется не тепловым размытием функции распределения Ферми, как у МКО, а только зависящими от температуры механизмами рассеяния электронов. Такие осцилляции заметны при существенно более высоких температурах, чем МКО, и удобны для экспериментальных наблюдений.

Понимание природы медленных осцилляций открывает возможности для их идентификации и позволяет извлечь из имеющихся данных важный параметр зонной структуры электронов - величину интеграла межслоевого перескока. Угловая зависимость частоты медленных осцилляций содержит информацию об импульсе Ферми электронов в проводящей плоскости.

Обсуждение деталей поведения угловых осцилляций магнетосопротивления продолжено в **третьей** главе диссертации. В рамках стандартной теории магнитопроводимости получены новые полезные формулы и исследована область применимости широко используемых более ранних результатов. Отмечены возможные отклонения от стандартной теории угловой зависимости магнитопроводимости. В частности, изучено влияние продольного межслоевого магнетосопротивления из главы 1, а также наличие незонных (или "некогерентных") механизмов межслоевой проводимости в угловой зависимости магнетосопротивления, таких как межслоевой перенос электронов по резонансным примесям.

Четвертая глава диссертации содержит фрагменты теории проводимости при наличии в системе волн зарядовой (ВЗП), или спиновой (ВСП) плотностей. Исследована структура параметра порядка и фазовая диаграмма ВЗП в сильном магнитном поле, которое из-за зеемановского расщепления нарушает условие нестинга для одной из спиновых компонент электронов. Обсуждаются возможности существования и фазовая диаграмма неоднородной волны зарядовой или спиновой плотности при неидеальном нестинге (так называемой солитонной фазы). Предсказан скачок анизотропии проводимости при переходе в состояние с волной плотности для различных структур параметра порядка этой волны плотности. Обращается внимание на ряд качественных эффектов, связанных с перестройкой поверхности Ферми за счет рассеяния электронов на периодическом потенциале ВЗП.

В **пятой** главе речь идет об условиях сосуществования сверхпроводимости и ВЗП а также ВСП. Исследован вопрос о поведении температуры сверхпроводящего перехода и верхнего критического поля H_{c2} на фоне ВЗП. Отмечено, что волна плотности не всегда экспоненциально уменьшает температуру сверхпроводящего перехода. Реально следует учитывать согласованно образование щели ВЗП и ее влияние на закон дисперсии квазичастиц. Как следствие, волна плотности может и повышать температуру сверхпроводящего перехода. Эффект повышения наблюдается в ряде органических металлов, где имеется возможность подавить ВЗП повышением внешнего давления. Показано также, что верхнее критическое поле сверхпроводимости в присутствии ВЗП может возрасти в несколько раз, даже если температура сверхпроводящего перехода падает под действием ВЗП. Эти эффекты обусловлены изменением закона дисперсии электронов под влиянием ВЗП. Их свойства обсуждаются в рамках приближения среднего поля с учетом микроскопической структуры ВЗП при неидеальном нестинге поверхности Ферми.

В аналогичной манере изучается взаимодействие спиновой структуры параметров порядка сверхпроводимости и волны спиновой плотности.

В приложениях диссертации вынесены громоздкие вычисления и изложение некоторых вспомогательных вопросов. Имеется также **Заключение**, **список публикаций** (включает 22 публикации в высокорейтинговых международных журналах, входящих в систему Web of Science) и **список литературы** (содержит 352 ссылки).

Оценивая содержание диссертации в целом, резюмируем следующее. Работы, составившие ее основу, стимулировались нарастающим интересом к свойствам известных и создаваемых в последнее время слоистых проводников: природному и интеркалированному графиту, органическим металлам, гетероструктурам, различным редкоземельным и тяжелофермионным соединениям и, в некоторых аспектах, высокотемпературным сверхпроводникам. Наряду со спецификой, ради которой и создаются искусственные материалы, необходима по возможности общая, феноменологическая точка зрения на происходящее с проводимостью в актуальном интервале параметров: деталях структуры, плотности электронов, магнитному полю, температуре и т.п. Результаты Диссертации дают основание говорить о появлении такого согласованного понимания и его **научной новизне и актуальности**.

Основой диссертации являются три ее первых главы. Здесь формулируются базисные определения, обсуждаются ограничения стандартной трехмерной теории магнетосопротивления в сильно анизотропных квазидвумерных металлах, предлагается теория межслоевой проводимости в сильном магнитном поле, устраняющая существующие ограничения и дающая объяснение многим достаточно общим качественным эффектам, важным для понимания электронных свойств слоистых проводников. Среди них - появление межслоевого продольного магнетосопротивления с количественными, наблюдаемыми экспериментально, «нюансами» магнитного поведения в зависимости от степени загрязненности образцов, природа наблюдаемых «медленных» осцилляций Шубникова – де Гааза, включая их специфическую температурную зависимость, сдвиг фазы биений квантовых осцилляций магнетосопротивления относительно намагниченности и т.п. Здесь же - описание деталей магнито--транспорта в системах с волной зарядовой или спиновой плотности.

Важной отличительной чертой работ диссертанта является детальное сравнение основных полученных выводов с имеющимися, либо стимулированными его активностью, экспериментами, как правило, в пользу выводов теории. Результаты диссертации **широко используются научными коллективами**, занимающимися определением электронных свойств сильно анизотропных слоистых проводников (например, органических металлов) по данным о полевой и угловой зависимости магнетосопротивления. Все это в целом дает основание говорить о **значимости для науки и практики результатов** обсуждаемой диссертации

Содержание работ и диссертации отражают **высокую квалификацию** соискателя в области теоретической физики твердого тела. На статьи по темам, включенным в диссертацию, имеется около 300 цитирований в Web of Science, из которых около 200 без самоцитирования.

Достоверность выводов диссертации гарантируется надежностью применявшихся методов расчета и реалистичностью выбранных феноменологических моделей, использованием нескольких перекрестных и взаимно дополняющих методов расчета, а также согласием с данными физических экспериментов и других более поздних теоретических исследований. Основные результаты диссертации широко обсуждались на международных конференциях по данной тематике.

В качестве **замечания** можно отметить следующее. В диссертации при рассмотрении транспортных явлений в неидеальных слоистых системах фактически отсутствует последовательная теория влияния отклонения от идеальности, связанного с локальными флуктуациями межплоскостного расстояния и вызванного ими локальным увеличением

амплитуды межплоскостного туннелирования. Ввиду сильной зависимости поперечного транспорта от межплоскостного расстояния, такая неупорядоченность могла бы привести к неоднородному вдоль слоев распределению поперечного к слоям тока и повлиять на характер рассматриваемых в работе транспортных явлений. Рассмотрение этого вопроса в диссертации носит поверхностный характер.

Данное замечание не влияет на общую положительную оценку работы, а, скорее, подчеркивают сложность поставленной диссертантом задачи единообразного описания большого числа наблюдаемых фактов в слоистых проводящих средах.

Результаты, полученные автором диссертации, имеют существенное значение для исследования электронных свойств сильно анизотропных проводников в научных коллективах ведущих российских и зарубежных Институтов (ИФТТ РАН, ФИ РАН, ИПХФ РАН, ИРЭ РАН, WMI (Гархинг, Германия), и др.). Выводы диссертации достаточно обоснованы. Работа отвечает требованиям п.9 «Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к докторским диссертациям», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а П.Д. Григорьев заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Автореферат отвечает содержанию диссертации. Язык и стиль Автореферата ясны и в меру лаконичны.

Результаты диссертации обсуждались и были одобрены на научном семинаре теоретического отдела ИФТТ РАН 20.04.2015, а также на научном семинаре "Физика низких температур" ИФТТ РАН 22.04.2015.

Отзыв составили:

Главный научный сотрудник теоретического отдела ИФТТ РАН
д.ф.-м.н., 01.04.02 – теоретическая физика, профессор

Валерий Борисович Шикин

Руководитель теоретического отдела ИФТТ РАН
к.ф.-м.н., 01.04.02 – теоретическая физика

Виктор Меерович Эдельштейн

ИФТТ РАН, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна д.2, 142432, Россия
Телефон: 8(496) 52 219-82

E-mail: adm@issp.ac.ru

Горшков Шикин Эдельштейн В.М.
заверяю: Шикин В.М. Григорьев

