

Могилюк Тарас Игоревич

**Магнитные квантовые и угловые осцилляции проводимости
в слоистых металлах**

Специальность 01.04.07 —
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа прошла апробацию на заседании секции Учёного совета по направлению «Общая и ядерная физика» Курчатовского ядерно-физического комплекса НИЦ «Курчатовский институт» «27» ноября 2020 г.

Научный руководитель: **Григорьев Павел Дмитриевич**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твёрдого тела Российской академии наук

Защита состоится «23» марта 2021 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета ФАКТ.01.04.07.001 по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>.

Работа представлена «11» декабря 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национального исследовательского университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п. 3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Работа посвящена рассмотрению кинетических свойств слоистых квазидвумерных металлов в квантовом магнитном поле при низких температурах. К слоистым металлам относятся активно изучаемые соединения, включая высокотемпературные сверхпроводники, органические металлы, гетероструктуры и др. Квантовое магнитное поле часто применяется для изучения электронной структуры этих материалов. В диссертации рассматриваются магнитные квантовые осцилляции электропроводности, также так называемые «медленные» и угловые осцилляции, о которых будет написано подробнее ниже.

Впервые магнитные квантовые осцилляции намагниченности и проводимости были экспериментально обнаружены в 1930 году в бисмуте [1–3]. Они возникают из-за квантования уровней энергии электронов в магнитном поле [4]. Частота магнитных квантовых осцилляций пропорциональна экстремальному сечению поверхности Ферми, перпендикулярному магнитному полю. Изучая магнитные квантовые осцилляции, можно определить геометрию поверхности Ферми в металлах, а также получить информацию об эффективной массе, ширине уровней и g -факторе носителей заряда.

Угловые осцилляции магнетосопротивления изначально были обнаружены в квазидвумерных органических металлах вида $(BEDT-TTF)_2X$ [5–8]. При поворотах слоистой структуры в магнитном поле наблюдаются квазипериодические осцилляции магнетосопротивления как функции угла наклона поля по отношению к нормали к слоям. При анализе угловых осцилляций магнетосопротивления особое значение играют так называемые «магические углы» или «углы Ямаджи», т. е. углы наклона магнитного поля, при которых межслоевое сопротивление принимает максимальную величину [9]. Углы Ямаджи не зависят от величины магнитного поля и находятся из условия: $J_0(k_F d \tan \theta) = 0$, где k_F — внутрислоевой импульс Ферми, d — межслоевое расстояние. По положению углов Ямаджи можно выяснить величину k_F и геометрические характеристики поверхности Ферми квазидвумерных слоистых проводников.

Первый раз «медленные» осцилляции были открыты Карцовником М. В. и др. в 1988 году [7; 8]. Одно из объяснений обнаруженных осцилляций основывалось на предположении о существовании дополнительных небольших карманов поверхности Ферми, вносящих свой вклад в магнитные квантовые осцилляции. Однако такое объяснение вносило дополнительные трудности. В работах Григорьева П. Д. [10; 11] в качестве основной причины медленных осцилляций выдвигалась гофрированность поверхности Ферми. Эффект напоминает межподзонные осцилляции, открытые ранее в полупроводниках. Медленные осцилляции согласно работе возникали из-за зацепления магнитных квантовых осцилляций с близкими частотами от двух близких по площади экстремальных сечений поверхности Ферми. Медленные осцилляции отчётливо проявляются в сильно анизотропных слоистых металлах при величине

интеграла межслоевого перескока $t_z > \hbar\omega_c$. Также возникает сдвиг фаз биений квантовых осцилляций транспортных и термодинамических величин. Привычная всем трёхмерная теория не в состоянии объяснить таковые два явления, так как они появляются в высших порядках малости по отношению $\hbar\omega_c/t_z$.

Целью данной работы является теоретическое исследование осцилляций проводимости в слоистых металлах в магнитном поле при низкой температуре. В частности рассмотреть взаимное влияние угловых и квантовых осцилляций межслоевой проводимости, медленные осцилляции.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Теоретически исследовать осцилляции проводимости в слоистых металлах в магнитном поле при низкой температуре.
2. Вычислить межслоевую проводимость в квантующем магнитном поле с учётом как угловых, так и квантовых осцилляций.
3. Рассмотреть взаимное влияние угловых и квантовых осцилляций межслоевой проводимости в квазидвумерных металлах. Определить область применимости их независимого рассмотрения.
4. Вычислить осцилляции проводимости вдоль проводящих слоёв в квантующем магнитном поле в квазидвумерных металлах.
5. Сравнить квантовые и медленные осцилляции проводимости вдоль и поперек проводящих слоёв в сильном магнитном поле.

Научная новизна:

1. Впервые было получено выражение для шубниковских и так называемых «медленных» осцилляций внутрислоевой проводимости в слоистом проводнике с использованием формулы Кубо в самосогласованном борновском приближении.
2. Впервые выведено выражение для межслоевой проводимости в слоистом проводнике, содержащее как угловые, так и магнитные квантовые осцилляции. Продемонстрировано взаимное влияние угловых и квантовых магнитных осцилляций. Проведено сравнение характера осцилляций для разных форм уровней Ландау. Показано, как угловые осцилляции приводят к немонотонной угловой зависимости амплитуды квантовых осцилляций и к новому явлению, названному «ложными спиновыми нулями».

Практическая значимость. Найденные выражения полезны для анализа экспериментальных данных по проводимости слоистых проводников в магнитном поле при низких температурах. Используя полученные формулы, можно оценить микроскопические параметры слоистой системы: эффективную массу электрона, время свободного пробега носителей заряда, их импульс Ферми, интеграл межслоевого перескока, а также получить сведения о типе беспорядка.

Методология и методы исследования. Теоретическое исследование использовало аппарат функций Грина и диаграммной техники Фейнмана, самосогласованное борновское приближение.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В рамках двухслойной модели получена аналитическая формула для межслойной проводимости квазидвумерных металлов в магнитном поле при низких температурах для произвольных форм уровней Ландау, содержащая угловые и квантовые осцилляции.
2. Показано, что при одних и тех же параметрах угловые осцилляции для лоренцевой формы уровней Ландау более плавные, чем для гауссовой и выведенной в самосогласованном борновском приближении.
3. В рамках той же модели показано взаимовлияние магнитных квантовых и угловых осцилляций межслойной проводимости. Угловые осцилляции приводят к осцилляциям амплитуды (биениям) магнитных квантовых осцилляций.
4. Выведено аналитическое выражение для магнитных квантовых осцилляций диагональной внутрислойной проводимости в слоистой квазидвумерной системе в первом порядке малости по множителю Дингла для магнитных квантовых осцилляций и втором порядке малости для медленных осцилляций.
5. Показано, что амплитуда медленных осцилляций внутрислойной проводимости немонотонна и меняет знак с ростом магнитного поля.

Достоверность подтверждается соответствием с теоретическими работами других авторов в предельных случаях. Для расчётов применялась опробованная во многих задачах и надёжная диаграммная техника Фейнмана в самосогласованном борновском приближении.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Стендовый доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Угловая зависимость магнитосопротивления в сильно анизотропных квазидвумерных металлах при различных формах уровней Ландау». // 48-я Школа ПИ-ЯФ, 10–15 марта 2014, г. Санкт-Петербург.
2. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Угловая зависимость магнитосопротивления в сильно анизотропных квазидвумерных металлах для различных форм уровня». // XIII Школа-конференция молодых учёных «Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений», 12–21 сентября 2014, г. Сочи.
3. Стендовый доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D., «Angular dependence of magnetoresistance in strongly anisotropic quasi-two-dimensional metals: the influence of Landau-level shape». // XV Школа молодых учёных (ФИАН), 16–18 ноября 2014, г. Москва.
4. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Угловая зависимость амплитуды квантовых осцилляций магнитосопротивления и их поведение вблизи углов Ямаджи». // XIV Школа-конференция молодых учёных «Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений. Идеи и методы физики конденсированного состояния», 11–20 сентября 2015, г. Сочи.

5. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Угловая зависимость квантовых осцилляций магнитосопротивления в сильно анизотропных слоистых квазидвумерных проводниках». // Международная конференция ФизикА.СПб/2015, 26–29 ноября 2015, г. Санкт-Петербург.
6. Стендовый доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Медленные осцилляции поперечного магнитосопротивления в слоистых материалах в слабом магнитном поле». // XIV Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», 3 июня 2016, г. Троицк, г. Москва.
7. Стендовый доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «Slow oscillations of transverse magnetoresistance in anisotropic quasi-two-dimensional conductors». // International Workshop Localization, Interactions and Superconductivity, 27 июня—1 июля 2016, г. Черногоровка.
8. Стендовый доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «Slow oscillations of transverse magnetoresistance in anisotropic quasi-two-dimensional conductors». // The Summer School 2016 (Russian Quantum Center), 22–27 августа 2016, г. Москва.
9. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Медленные осцилляции магнитосопротивления в анизотропных квазидвумерных слоистых металлах». // XV Конференция молодых учёных «Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений», 16–26 сентября 2016, г. Троицк, г. Москва.
10. Стендовый доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «Slow oscillations of transverse magnetoresistance in anisotropic quasi-two-dimensional layered conductors». // Международная конференция ФизикА.СПб/2016, 1–3 ноября 2016, г. Санкт-Петербург.
11. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Тензор магнетопроводимости в слоистых материалах». // XVII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17), 15–22 ноября 2016, г. Екатеринбург.
12. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Тензор проводимости в слоистых материалах в магнитном поле». // 59-я научная конференция МФТИ, 21–26 ноября 2016, г. Долгопрудный.
13. Стендовый доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Угловая зависимость магнитных квантовых осцилляций в квазидвумерных металлах». // XV Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления» памяти бессменного председателя конференции академика Келдыша Л.В., 7 июня 2017, г. Троицк, г. Москва.
14. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Осцилляции проводимости в магнитном поле в слоистых материалах». // Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления

- в конденсированных средах», посвящённая 60-летию Института физики ДНЦ РАН и 110-летию Амирханова Х.И., 6–9 сентября 2017, г. Махачкала.
15. Устный доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «False spin zeros in the angular dependence of magnetic quantum oscillations in quasi-two-dimensional metals». // XVI Международная школа-конференция «Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений. Идеи и методы физики конденсированного состояния II», 15–24 сентября 2017, г. Сочи.
 16. Стендовый доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «False spin zeros in the angular dependence of magnetic quantum oscillations in quasi-two-dimensional metals». // International conference Physica.SPb/2017, 24–26 октября 2017, г. Санкт-Петербург.
 17. Устный доклад: Могилюк Т. И., «Ложные спиновые нули в угловой зависимости магнитных квантовых осцилляций в квазидвумерных металлах». // XVIII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-18), 16–23 ноября 2017, г. Екатеринбург.
 18. Стендовый доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Медленные осцилляции поперечного магнетосопротивления в слоистых материалах в слабом магнитном поле». // 51-я Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния, 11–16 марта 2017, г. Санкт-Петербург.
 19. Стендовый доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «Interplay between quantum and angular oscillations in layered structures». // 2017 Winter workshop-school on localization, interactions and superconductivity, 17–21 декабря 2017, г. Черноголовка.
 20. Устный доклад: Могилюк Т. И., Кешарпу К. К., Григорьев П. Д. «Анизотропное влияние зарождающейся сверхпроводимости на электронный транспорт в FeSe». // Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз 2018», 31 января–1 февраля 2018, г. Москва.
 21. Устный доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «Interplay between quantum and angular magnetoresistance oscillations». // International Winter School of Theoretical Physics «Kourovka», 25 февраля–3 марта 2018, г. Екатеринбург.
 22. XVI Стендовый доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Анизотропное влияние зарождающейся сверхпроводимости на электронный транспорт в FeSe». // XVI Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», 7 июня 2018, г. Троицк, г. Москва.
 23. Стендовый доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «Anisotropic effect of appearing superconductivity on the electron transport in FeSe». //

- Международная школа/конференция «Локализации, взаимодействия и сверхпроводимость», 30 июня—4 июля 2018, г. Черноголовка.
24. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Анизотропное влияние зарождающейся сверхпроводимости на электронный транспорт в FeSe». // XVII Всероссийская конференция «Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений», 14—23 сентября 2018, г. Сочи.
 25. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Анизотропное влияние зарождающейся сверхпроводимости на электронный транспорт в FeSe». // XIX Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-19) памяти Танкеева А.П., 21 ноября—28 ноября 2019, г. Екатеринбург.
 26. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Анизотропное влияние зарождающейся сверхпроводимости на электронный транспорт в FeSe». // 15-я зимняя школа по теоретической физике «Сложные системы и перспективные материалы», 28 января—1 февраля 2019, ОИЯИ г. Дубна, г. Москва.
 27. Устный доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «Magnetic quantum oscillations of in-plane conductivity in quasi-two-dimensional metals». // Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз 2019», 12—15 февраля 2019, г. Москва.
 28. Стендовый доклад: Григорьев П. Д., Синченко А. А., Кешарпу К. К., Могилюк Т. И. «Изменение анизотропии проводимости при зарождении сверхпроводимости в виде редких изолированных островков: теория и применение к слоистым сверхпроводникам». // Совещание по теории твёрдого тела, 28—30 мая 2019, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург.
 29. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «О влиянии действительной части собственно-энергетической функции на магнитные квантовые осцилляции намагниченности и сопротивления». // XVII Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», 6 июня 2019, г. Троицк, г. Москва.
 30. Стендовый доклад: Mogilyuk T. I., Grigoriev P. D. «Interaction of angular and quantum magnetoresistance oscillations in quasi-2D metals. The effect of real part of electron self-energy». // Modern Trends in Condensed Matter Physics (Lev Gorkov Memorial Conference), 24—27 июня 2019, г. Черноголовка.
 31. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «О влиянии действительной части собственно-энергетической функции на магнитные квантовые осцилляции намагниченности и сопротивления». // XVIII Школа-конференция молодых учёных «Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений. Идеи и методы физики конденсированного состояния III», 18—29 сентября 2019, г. Сочи.

32. Устный доклад: Могилюк Т. И., Григорьев П. Д. «Влияние действительной части собственнo-энергетической функции на магнитные квантовые осцилляции намагничeнности и сопротивления в слоистых материалах». // XX Юбилейная Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-20), 21 ноября—28 ноября 2019, г. Екатеринбург.

Личный вклад. Автор проводил аналитические и численные расчёты, готовил публикации и доклады для конференций.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 24 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, из которых 3 работы в журнале *Physical Review B*, а 22 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена квантово-механическому расчёту межслоевой проводимости σ_{zz} в квазидвумерных слоистых металлах в наклонном магнитном поле, направленном под углом θ к нормали к проводящим слоям. Принимаются во внимание магнитные квантовые осцилляции и их влияние на угловые осцилляции магнетосопротивления. В параграфе 1.2 мы формулируем двуслоевую модель, в рамках которой выполнены расчёты в этой главе. В параграфе 1.3 получено выражение для межслоевой проводимости для любой формы уровней Ландау, не зависящей от номера уровня. В параграфе 1.4 мы получим явные результаты для лоренцевой, куполовидной формы, найденной в самосогласованном борновском приближении, и гауссовой форм уровней Ландау. Расчёт показывает, как важен учёт форму уровней Ландау для угловой зависимости магнетосопротивления. Амплитуда угловых осцилляций магнетосопротивления больше для гауссовой или колоколообразной формы самосогласованного борновского приближения, относящихся к микроскопическим моделям при $t_z \ll \Gamma \ll \hbar\omega_c$, а не часто используемой лоренцевой формы уровней Ландау (см. рисунок 1). С ростом магнитного поля величина насыщения межслоевой проводимости в углах Ямаджи достигается значительно быстрее для гауссовой и колоколообразной формы самосогласованного борновского приближения, чем для лоренцевой формы. В параграфе 1.5 мы покажем, что отношение $\sigma_{zz}(\theta = 0)/\sigma_{zz}(\theta \rightarrow \pm 90^\circ)$ для гауссовой или колоколообразной самосогласованного борновского приближения форм уровней Ландау также в несколько раз больше, чем для лоренцевой. При всём том отношение $\sigma_{zz}(\theta \rightarrow \pm 90^\circ)/\sigma_{zz}^0$ (σ_{zz}^0 — межслоевая проводимость в нулевом магнитном

поле) не зависит от формы уровней Ландау и обеспечивает метод определения времени свободного пробега τ_0 в нулевом магнитном поле, которое может заметно отличаться от времени свободного пробега τ , найденного из данных по температуре Дингла. В параграфе 1.6 анализируется угловая зависимость усреднённого по магнитным квантовым осцилляциям межслоевого спинового тока $\bar{\sigma}_{zz}$, создаваемого зеемановским расщеплением. Строятся графики для $\bar{\sigma}_{zz}(\theta)/\sigma_{zz}(\theta)$ для различных форм уровней Ландау. В случае гауссовой и колоколообразной форм уровней Ландау угловые осцилляции размашистее (амплитуда осцилляций больше вдоль оси y), чем для лоренцевой формы уровней. На рисунке 1 приведена угловая зависимость межслоевой проводимости для разных форм уровней Ландау. Обратим внимание, что при $\omega_c\tau \gg 1$ монотонная часть спинового тока меняет знак вблизи углов Ямаджи от «-» к «+» и меняет знак обратно в экстремумах $\sigma_{zz}(\theta)$. Угловые осцилляции спинового тока сильнее и сдвинуты на фазу $\sim \pi/2$ в сравнении с угловыми осцилляциями магнетопроводимости. Для типичных значений параметров в органических металле в α -(BEDT-TTF)₂KHg(SCN)₄ поле $B \sim 10$ Т сила спинового тока достигает порядка 2% от силы электрического тока в нулевом магнитном поле. Однако же, поскольку в углах Ямаджи $\sigma_{zz}(\theta)/\sigma_{zz}(0) \ll 1$, то спиновый ток может быть сравним с током заряда для таких углов при $\omega_c\tau \gg 1$. В параграфе 1.7 изучается влияние угловых осцилляций на квантовые осцилляции магнетосопротивления. Доказывается, как прежнее предположение о разбиение выражения для межслоевой магнетопроводимости на произведение двух множителей, независимо описывающих угловые и магнитные квантовые осцилляции, часто применяемое для анализа экспериментальных результатов, нарушается в сильных магнитных полях при $\omega_c\tau \gtrsim 1$. Грубейшее нарушение такой факторизации происходит вблизи углов Ямаджи (максимумов угловых осцилляций межслоевой магнетопроводимости), где амплитуда магнитных квантовых осцилляций магнетопроводимости резко сокращена. Взаимодействие угловых и квантовых осцилляций магнетопроводимости создаёт следующий качественный эффект — колебания амплитуды (биения) квантовых осцилляций как функции угла наклона θ магнитного поля. Углы, при которых видны минимумы амплитуды магнитных квантовых осцилляций, возникающие из-за угловых осцилляций магнетопроводимости и называемые «ложными» спиновыми нулями, могут быть ошибочно приняты за спиновые нули, приводя к неверному вычислению g -фактора электрона из анализа магнитных квантовых осцилляций. Предложенные ложные спиновые нули не создают инверсии фазы магнитных квантовых осцилляций, и так их можно отделить от истинных спиновых нулей. Ложные спиновые нули заметнее при высоких значениях $\omega_c\tau$ и при высоких значениях $k_F d$, где угловые осцилляции магнетосопротивления имеют большую частоту. Некогерентные каналы межслоевой проводимости также делают предложенный эффект ложных спиновых нулей заметнее. На рисунке 2 отражено появление ложных спиновых нулей при углах наклона магнитного поля $\theta \approx \{30^\circ, 53^\circ, 64^\circ, 70^\circ\}$ при большой силе электронного

резервуара (электронных состояний, не создающих магнитные квантовые осцилляции межслоевой проводимости, но влияющих на общую проводимость) и некогерентном канале проводимости с $\sigma_{zz}^i = 0.01\sigma_{zz}^0$. Ложные спиновые нули могут помочь определить вклад такого некогерентного канала в общую межслоевую проводимость из экспериментальных данных. Сравнение амплитуд угловых и магнитных квантовых осцилляций способно содействовать в определении характера беспорядка, устанавливающего температуру Дингла.

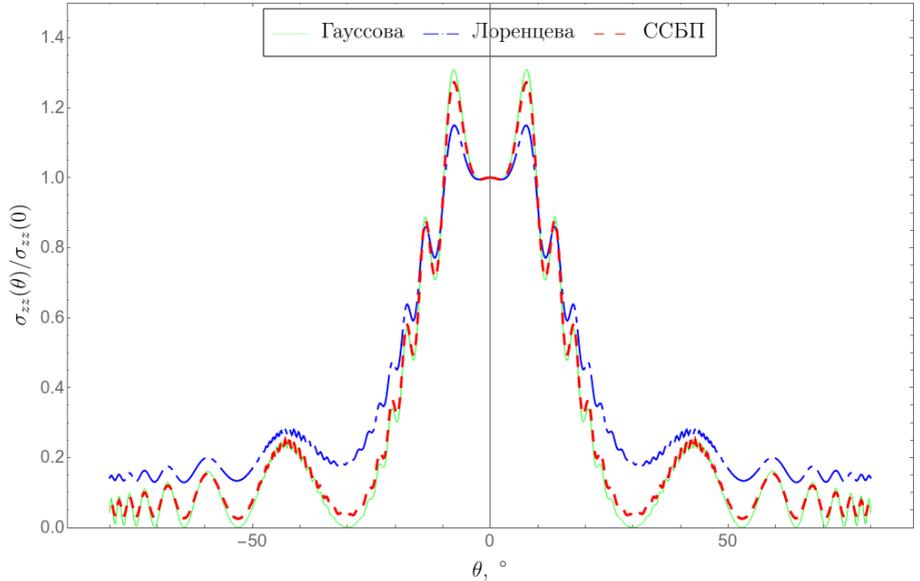
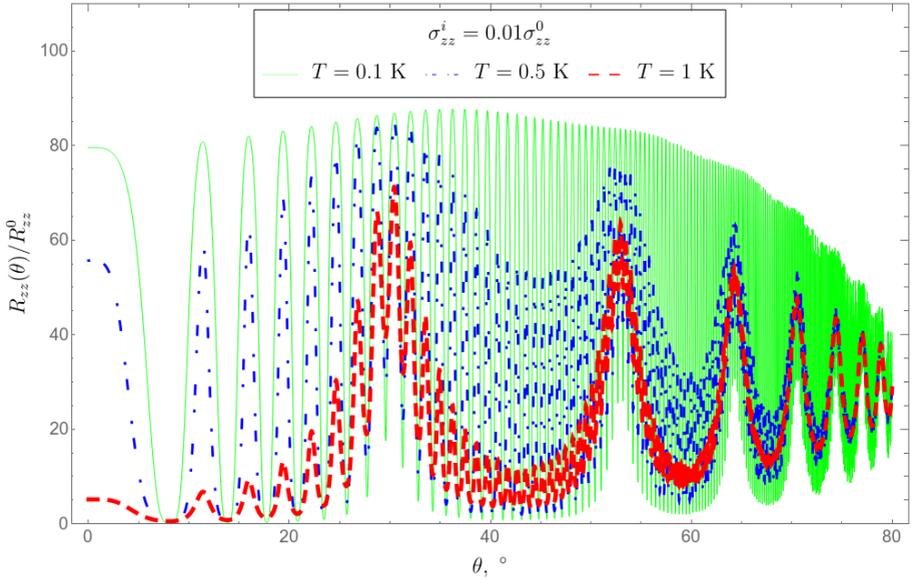
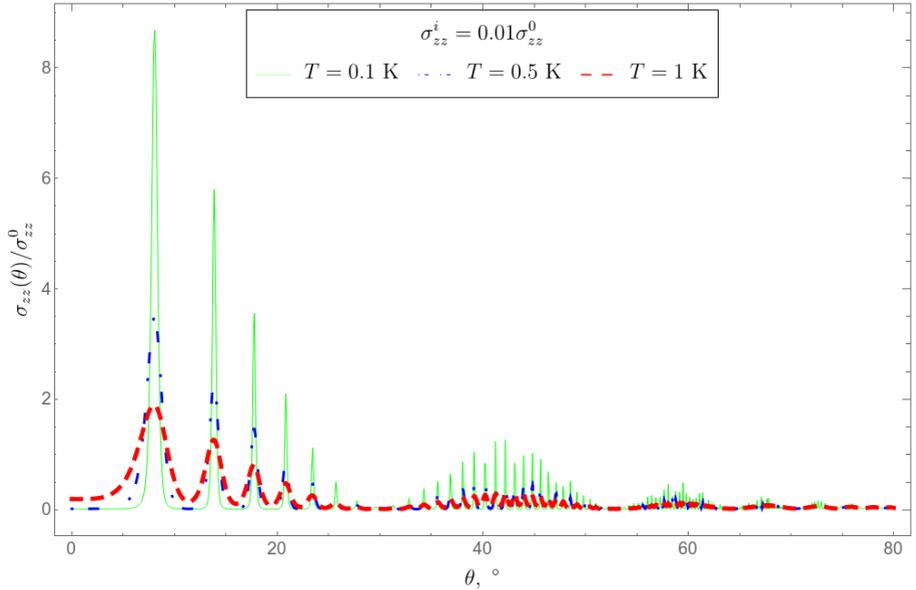


Рисунок 1 — Угловая зависимость нормированной межслоевой проводимости σ_{zz} при $k_F d \approx 4.17$, $\hbar\omega_{c0} = 3\pi$ К, $\mu = 150\pi$ К, $\Gamma_0 = 3\pi/20$ К, $T = 2$ К для лоренцевой (синяя штрих-пунктирная линия), гауссовой (зелёная сплошная линия), колокообразной (красная пунктирная линия), относящей к самосогласованному борновскому приближению, форм уровней Ландау (для гауссовой и лоренцевой форм используется перенормировка для $\Gamma(B_z)$ как в формуле (1.36) из текста диссертации).

Вторая глава посвящена исследованию магнитных квантовых осцилляций внутрислоевой магнетопроводимости σ_{xx} в квазидвумерных металлах. Проводимый в параграфах 2–2.1.2 расчёт основан на формуле Кубо и гармоническом разложении. Принимается во внимание рассеяние электронов на короткодействующих примесях. Пренебрегается электрон-электронным взаимодействием. Последнее приближение оправдано в металлическом пределе при большом количестве заполненных уровне Ландау и конечном межслоевом интеграле перескока t_z . Мы рассчитали аналитически амплитуды и фазы обычных магнитных квантовых осцилляций проводимости и намагниченности

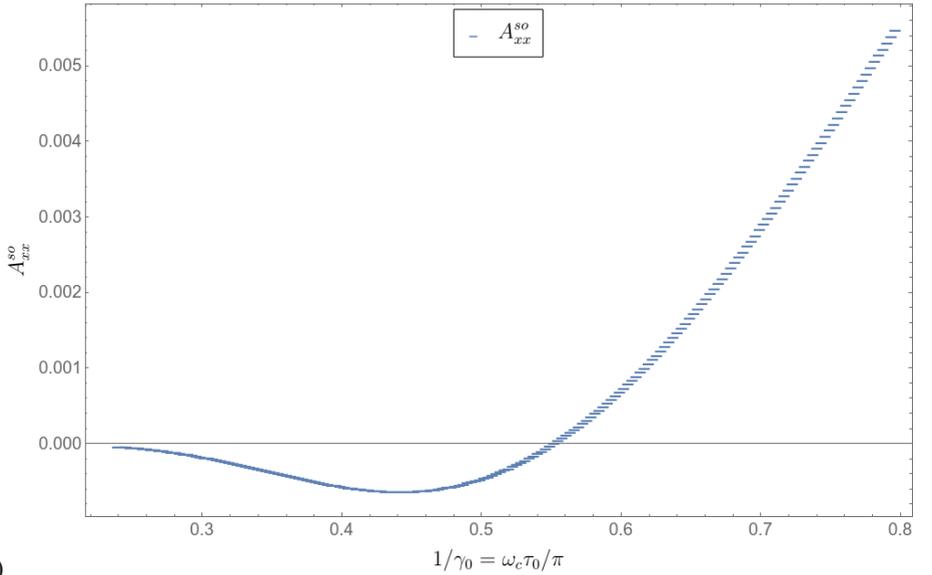


а)

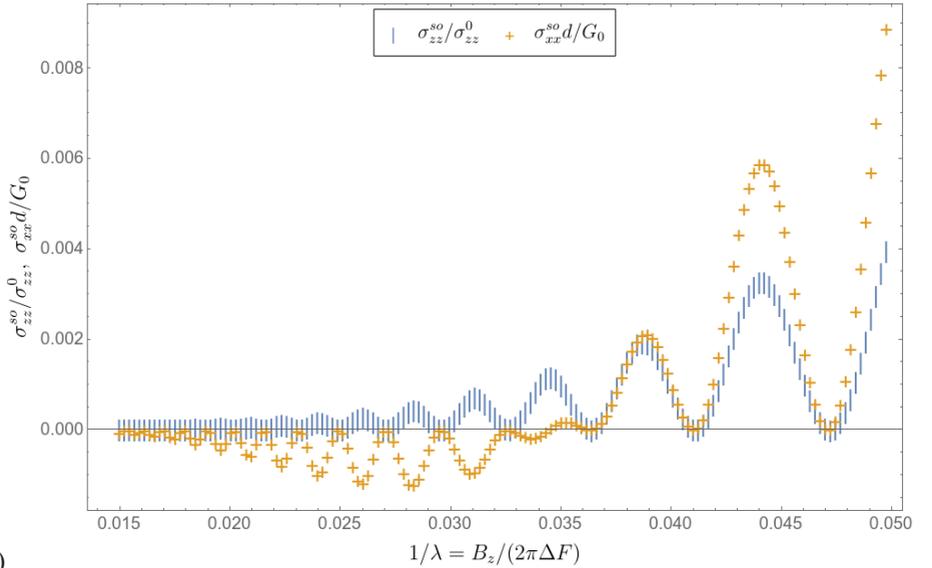


б)

Рисунок 2 — Угловая зависимость нормированных а) проводимости $\sigma_{zz}/\sigma_{zz}^0$ и б) сопротивления R_{zz}/R_{zz}^0 при сильном электронном резервуаре, $k_F d = \kappa_1/\tan(\pi/6) \approx 4.17$, $\hbar\omega_{c0} = 3\pi$ К, $\Gamma_0 = 3\pi/20$ К, $\mu = 150\pi$ К, $\sigma_{zz}^i = 0.01\sigma_{zz}^0$, $R_{zz}^0 = 1/\sigma_{zz}^0$, T : 0.1 К (сплошная зелёная линия), 0.5 К (штрих-пунктирная голубая), 1 К (пунктирная красная). Минимумы амплитуды МКО обманчиво похожи на спиновые нули. Первый угол Ямаджи равен 30° .



а)



б)

Рисунок 3 — а) Амплитуда A_{xx}^{so} медленных осцилляций нормированной внутрислоевой диагональной проводимости $\sigma_{xx}^{so}d/G_0$ как функция $1/\gamma_0 = \hbar\omega_c/(2\pi\Gamma_0) \propto B_z$. Знак A_{xx}^{so} меняется при $\gamma_0 = \pi/\sqrt{3}$. б) Медленные осцилляции внутрислоевой σ_{xx} и межслоевой σ_{zz} проводимостей как функций $1/\lambda = \hbar\omega_c/(4\pi t_z) \propto B_z$ ($\Delta F \approx 2t_z B_z/(\hbar\omega_c)$, $G_0 = e^2/(\pi\hbar)$, d —межслоевое расстояние). Медленные осцилляции σ_{xx} и σ_{zz} противофазны в слабом магнитном поле и синфазны в сильном. Принятые параметры таковы:

$$m_* = 0.04m_e, \Gamma_0 = 14.5 \text{ К}, t_{\chi} = 20 \text{ мЭВ}, \bar{\epsilon}_* = \mu = 200 \text{ мЭВ}.$$

и так называемых медленных осцилляций магнетопроводимости с частотой $\sim t_z$, возникающих при перемешивании двух близких частот магнитных квантовых осцилляций. Медленные осцилляции магнетопроводимости появляются лишь во втором порядке по фактору Дингла, но обычно они сильнее, чем магнитные квантовые осцилляции, поскольку последние дополнительно затухают из-за температуры и неоднородностей образца. В подпараграфе 2.1.3 описывается влияние беспорядка и температуры на квантовые и медленные осцилляции магнетопроводимости. Если влияние беспорядка и температуры для квантовых осцилляций сводится к появлению дополнительных подавляющих температурного R_T и пространственного R_W множителей, то для медленных осцилляций в первом приближении подобного подавления нет из-за отсутствия в их частоте энергии Ферми μ . В подпараграфе 2.1.4 рассматривается влияние спина электронов на магнитные квантовые и медленные осцилляции проводимости. Для параболической внутрислоевой дисперсии, в отсутствии любого взаимодействия между спиновыми компонентами зеемановской спиновое расщепление добавляет множитель $R_S = 2 \cos[\pi g m_*/(2m_e \cos \theta)]$ (m_* — эффективная масса электрона, m_e — масса свободного электрона, g — фактор Ланде электрона в слоистом металле) в магнитные квантовые осцилляции, а в медленные осцилляции множитель 2. В подпараграфе 2.1.5 полученное выражение для магнитных квантовых осцилляций проводимости сравнивается с выражением для двумерной проводимости, найденное в работе [12] в пределе $t_z = 0$, а также с выражением для трёхмерной проводимости из книги [13]. В параграфе 2.2 обсуждаются результаты. Сравнение внутрислоевой σ_{xx} и межслоевой σ_{zz} магнетопроводимостей показывает несколько качественных отличий между их осцилляциями. Амплитуда медленных осцилляций σ_{xx} имеет монотонную зависимость от магнитного поля. Эта амплитуда меняет знак при $\gamma_0 = \pi/(\omega_c \tau_0) = \pi/\sqrt{3}$, в то время как амплитуда медленных осцилляций σ_{zz} является монотонной функцией поля. Медленные осцилляции σ_{xx} и σ_{zz} имеют противоположную фазу в слабом магнитном поле и совпадающую фазу в сильном поле. Магнитные квантовые осцилляции проводимости σ_{zz} имеют кроссовер с инверсией фазы при $\lambda \sim 1$, а магнитные квантовые осцилляции проводимости σ_{xx} не имеют. Следовательно, подобно медленным осцилляциям, магнитные квантовые осцилляции σ_{zz} и σ_{xx} имеют противоположную фазу в слабом магнитном поле и совпадающую фазу в сильном магнитном поле. Кроссовер между пределами слабого и сильного магнитного поля для магнитных квантовых осцилляций σ_{zz} определяется параметром $\lambda = 4\pi t_z/(\hbar\omega_c)$, в то время как для медленных осцилляций σ_{xx} ведущий параметр $\gamma = 2\pi\Gamma/(\hbar\omega_c)$. На рисунке 3а изображена зависимость амплитуды медленных осцилляций как функции γ_0 , а на рисунке 3б сравниваются медленные осцилляции σ_{xx}^{so} и σ_{zz}^{so} . Примечательно, что колебания амплитуд магнитных квантовых осцилляций, называемых биениями и возникающих из-за интерференции двух близких частот, для σ_{xx} не являются полными, т. е. есть амплитуда осцилляций σ_{xx} отлична от нуля даже в узлах биений. Зависимый от поля сдвиг фаз биений, свойственный

квантовым осцилляциям σ_{zz} , не появляется в σ_{xx} . Тем не менее для σ_{xx} фаза самих магнитных квантовых осцилляций сдвигается на величину $\sim t_z/\mu$.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Получены аналитические выражения (1.25), (1.72—1.77) для межслоевой проводимости в магнитном поле в слоистом металле в рамках двухслоевой модели для произвольной электронной собственнo-энергетической функции, зависящей от энергии электрона, но не номера уровня Ландау. Эти выражения учитывают одновременно угловые и квантовые осцилляции в магнитном поле.
2. Анализ полученных выражений выявил зависимость амплитуды угловых осцилляций межслоевой проводимости в слоистом металле от формы уровней Ландау. Наиболее сильные угловые осцилляции наблюдаются при гауссовой форме уровней или колоколообразной форме в самосогласованном борновском приближении, а слабые — в случае лоренцевой формы.
3. Влияние угловых осцилляций на магнитные квантовые осцилляции приводит к биениям амплитуды квантовых осцилляций межслоевой проводимости. Такое влияние образует «шейки», напоминающие спиновые нули, на угловой зависимости межслоевой проводимости в магнитном поле, но, в отличие от спиновых нулей, это не приводит к инверсии фазы осцилляций. Шейки сильнее выражены при наличии дополнительных каналов некогерентного транспорта электронов, связанных с дополнительными состояниями вблизи уровня Ферми, не дающих вклада в магнитные квантовые осцилляции.
4. Получены аналитические выражения для шубниковских (2.40) и медленных осцилляций (2.46) внутрислоевой диагональной проводимости слоистого металла в самосогласованном борновском приближении для случая параболической внутрислоевой дисперсии. Обнаружено наличие инверсии фазы медленных осцилляций внутрислоевой проводимости, отсутствующее у медленных осцилляций межслоевой проводимости.
5. Проведено сравнение внутрислоевого и межслоевого магнетосопротивления в квазидвумерных металлах. Выявлены их качественные различия как в шубниковских, так и в медленных осцилляциях.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Grigoriev, P. D.* Angular dependence of magnetoresistance in strongly anisotropic quasi-two-dimensional metals: Influence of Landau-level shape / P. D. Grigoriev, T. I. Mogilyuk // Phys. Rev. B. — 2014. — Сент. — Т. 90, № 11. — С. 115138.

2. *Grigoriev, P. D.* Slow In-Plane Magnetoresistance Oscillations in Multiband Quasi-Two-Dimensional Metals / P. D. Grigoriev, M. M. Korshunov, T. I. Mogilyuk // *J. Supercond. Novel Magn.* — 2016. — Апр. — Т. 29, № 4. — С. 1127–1132.
3. *Grigoriev, P. D.* False spin zeros in the angular dependence of magnetic quantum oscillations in quasi-two-dimensional metals / P. D. Grigoriev, T. I. Mogilyuk // *Phys. Rev. B.* — 2017. — Май. — Т. 95, № 19. — С. 195130.
4. *Mogilyuk, T. I.* Magnetic oscillations of in-plane conductivity in quasi-two-dimensional metals / T. I. Mogilyuk, P. D. Grigoriev // *Phys. Rev. B.* — 2018. — Июль. — Т. 98, № 4. — С. 045118.
5. *Grigoriev, P. D.* Interplay between angular and quantum magnetoresistance oscillations / P. D. Grigoriev, T. I. Mogilyuk // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2018. — Июнь. — Т. 1038, № 1. — С. 012123.

Список литературы

1. *Schubnikow, L.* Magnetische Widerstandsvergrößerung in Einkristallen von Wismut bei tiefen Temperaturen / L. Schubnikow, W. J. de Haas // *Proc. R. Neth. Acad. Arts Sci.* — 1930. — Февр. — Т. 33. — С. 130–133.
2. *Schubnikow, L.* Neue Erscheinungen bei der Widerstandsänderung von Wismuthkristallen im Magnetfeld bei der Temperatur von flüssigem Wasserstoff (I) / L. Schubnikow, W. J. de Haas // *Proc. R. Neth. Acad. Arts Sci.* — 1930. — Апр. — Т. 33. — С. 363–378.
3. *De Haas, W. J.* The dependence of the susceptibility of diamagnetic metals upon the field / W. J. De Haas, P. M. Van Alphen // *Proc. R. Neth. Acad. Arts Sci.* — 1930. — Февр. — Т. 33. — С. 1106–1118.
4. *Shoenberg, D.* *Magnetic Oscillations in Metals* (Cambridge Monographs on Physics) / D. Shoenberg. — Cambridge University Press, 09.2009. — URL: <https://www.amazon.com/Magnetic-Oscillations-Cambridge-Monographs-Physics/dp/0521118786>.
5. Transverse magnetoresistance and Shubnikov-de Haas oscillations in the organic superconductor β -(ET)₂IBr₂ / M. V. Kartsovnik [и др.] // *Pisma v Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki.* — 1988. — Март. — Т. 47. — С. 302–305.
6. Transverse magnetoresistance and Shubnikov-de Haas oscillations in the organic superconductor β -(ET)₂IBr₂ / M. V. Kartsovnik [и др.] // *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters.* — 1988. — Март. — Т. 47. — С. 363–366. — URL: http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1093/article_16511.shtml.

7. Anisotropy of magnetoresistance and Shubnikov-de Haas oscillation in the organic metal β -(ET)₂IBr₂ / M. V. Kartsovnik [и др.] // Pisma v Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki. — 1988. — Ноябрь. — Т. 48. — С. 498–501.
8. Anisotropy of magnetoresistance and the Shubnikov-de Haas oscillations in the organic metal β -(ET)₂IBr₂ / M. V. Kartsovnik [и др.] // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 1988. — Ноябрь. — Т. 48. — С. 541–544. — URL: http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1109/article_16777.shtml.
9. *Yamaji, K.* On the Angle Dependence of the Magnetoresistance in Quasi-Two-Dimensional Organic Superconductors / K. Yamaji // J. Phys. Soc. Jpn. — 1989. — Май. — Т. 58, № 5. — С. 1520–1523.
10. Slow Oscillations of Magnetoresistance in Quasi-Two-Dimensional Metals / M. V. Kartsovnik [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2002. — Август. — Т. 89, № 12. — С. 126802.
11. *Grigoriev, P. D.* Theory of the Shubnikov–de Haas effect in quasi-two-dimensional metals / P. D. Grigoriev // Phys. Rev. B. — 2003. — Апрель. — Т. 67, № 14. — С. 144401.
12. *Ando, T.* Theory of Quantum Transport in a Two-Dimensional Electron System under Magnetic Fields. IV. Oscillatory Conductivity / T. Ando // J. Phys. Soc. Jpn. — 1974. — Ноябрь. — Т. 37, № 5. — С. 1233–1237.
13. *Pitaevskii, L. P.* Physical Kinetics, Volume 10 / L. P. Pitaevskii, E. M. Lifshitz, J. B. Sykes. — Pergamon, 01.1981. — URL: <https://www.elsevier.com/books/physical-kinetics/pitaevskii/978-0-08-026480-6>.

Отпечатано с оригинал-макетов Заказчика
в типографии «Переплетофф»
Адрес: г. Долгопрудный, ул. Циолковского, 4.
Тел: 8 (903) 511 76 03. www.perepletoff.ru
Формат 148 × 210 мм. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Тираж 20 экз.
Мягкий переплёт.
Заказ № _____ 30.12.20 г.