

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики полупроводников**



Рабочая программа дисциплины

**КВАНТОВЫЙ ТРАНСПОРТ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ**

направление подготовки: **03.04.02 Физика**

направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения

Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная ра- бота, не включая пе- риод сессии	Самостоятельная подготовка к проме- жуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные за- нятия			Консультации	Зачет	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	4
5. Перечень учебной литературы.	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	6
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	7

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Цель дисциплины — познакомить обучающихся с кругом явлений, относящихся к квантовому транспорту в низкоразмерных разупорядоченных проводниках, с современными методами и подходами, использующимися для их описания.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и способы постановки и решения задач исследования полупроводниковых низкоразмерных структур с помощью явлений квантового транспорта, понимать принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной криогенной техники; базовые разделы физики конденсированного состояния, физики полупроводников, баллистических и квантовых явлений в низкоразмерных полупроводниковых системах. Уметь делать качественные оценки характерных величин рассматриваемых физических эффектов; решать задачи из приложенных заданий.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Квантовый транспорт в низкоразмерных полупроводниковых структурах» представляет собой полугодовой курс, читаемый для обучающихся магистратуры физического факультета НГУ. Дисциплина предназначена для обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики полупроводников. Необходимыми предпосылками для успешного освоения курса является следующее.

В цикле разделов математики: знание основ линейной алгебры и математического анализа, умение дифференцировать и интегрировать, раскладывать функции в ряд Тейлора, решать простейшие дифференциальные уравнения, владеть методами векторного анализа.

В цикле разделов физики необходимыми предпосылками являются знание основ классической механики, молекулярной физики, электромагнетизма и электродинамики, квантовой механики, статистической физики и физики твёрдого тела.

В свою очередь, такие разделы курса как описание методов низкотемпературного эксперимента, технологии создания полупроводниковых наноструктур, а также описание всех основных

режимов электронного транспорта в низкоразмерных полупроводниковых наноструктурах, существенно расширяет кругозор и способствует успешной научно-исследовательской работе в области физики полупроводников.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 3 семестр – экзамен.

№		Вид деятельности	Семестр
			3
1		Лекции, ч	16
2		Практические занятия, ч	16
3		Лабораторные занятия, ч	-
4		Занятия в контактной форме, ч из них	36
5		аудиторных занятий, ч	32
6		в электронной форме, ч	-
7		консультаций, час.	2
8		промежуточная аттестация, ч	2
9		Самостоятельная работа, час.	36
10		Всего, ч	72

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

1. Введение. (2 часа)

Общие представления о курсе. Двумерный электронный газ, характерные длины, мезоскопия. Основные типы электронного транспорта в низкоразмерных системах.

2. Техника низкотемпературного эксперимента. Наноструктуры. (1 час)

2.1. Свойства ^4He . Диаграмма состояния. Сверхтекучесть, термомеханический эффект. ^4He -криостат.

2.2. Свойства ^3He . ^3He -криостат. Смесь ^3He и ^4He . Криостат растворения.

Нанотехнология и наноструктуры.

3. Квантовые интерференционные явления в неупорядоченных проводниках. (5 часов)

3.1. Слабая локализация. Квантовые поправки к проводимости. Влияние магнитного поля. Аномальное магнетосопротивление.

3.2. Универсальные флуктуации полной проводимости (кондактанса).

3.3. Сильная локализация. Прыжковая проводимость.

3.4. Локализация электронных волн в случайном потенциале (трехмерный, двумерный и одномерный случаи). Переход металл-диэлектрик. Переходы Мотта и Андерсона. Масштабная теория локализации.

4. Баллистический транспорт в низкоразмерных системах. **(4 часа)**
 - 4.1. Нарушение принципа локального равновесия в баллистическом проводнике. Нелокальность. Коллимация. Подавление эффекта Холла.
 - 4.2. Электронные бильярды. Аномальная диффузия.
 - 4.3. Баллистический микроконтакт. Квантование кондактанса. Квазиклассический предел.
 - 4.4. Электронный волновод. Баллистический многополюсник. Матрица коэффициентов прохождения. Теория Бюттикера — Ландауэра.
5. Адиабатический транспорт. **(2 часа)**
 - 5.1. Разупорядоченный проводник в сильном магнитном поле. Энергетический спектр. Краевые токовые состояния.
 - 5.2. Обратное рассеяние и интерференция на краевых токовых состояниях. Квантовый эффект Холла.
6. Одноэлектронный транспорт. **(1 час)**
 - 6.1. Квантовые точки и туннельные нанопереходы.
 - 6.2. Кулоновская блокада туннелирования.
 - 6.3. Одноэлектронный транзистор.
7. Дробный квантовый эффект Холла. **(1 час)**
 - 7.1. Частично заполненный уровень Ландау. Роль взаимодействия.
 - 7.2. Композитные фермионы.

Программа практических занятий (16 часов)

Занятие 1. Оценки различных типов проводимости в двумерном электронном газе. Вывод характерных длин, качественно меняющих характер проводимости. **(2 часа)**

Занятие 2. Сверхтекучесть и связанные с ней явления, численные оценки. **(2 часа)**

Занятие 3. Термодинамика смеси ^3He и ^4He . Принцип охлаждения, основанный на растворении ^3He и ^4He . **(1 час)**

Занятие 3. Вычисление квантовых поправок к проводимости, связанных со слабой локализацией и влияние на них магнитного поля. Рассмотрение случаев трех размерностей. **(2 часа)**

Занятие 4. Вычисление универсальных флуктуаций кондактанса для случая одномерных и двумерных проводников. **(2 часа)**

Занятие 6. Однопараметрический скейлинг. Вывод поправки к универсальной функции с помощью теории слабой локализации. **(1 час)**

Занятие 7. Баллистический транспорт. Теория Ландауэра. Вывод формулы для последовательного соединения проводников. **(2 часа)**

Занятие 8. Баллистический многополюсник. Вывод матрицы коэффициентов кондактанса для многотерминального проводника. **(2 часа)**

Занятие 8. Одноэлектронный транзистор. Вывод формул, определяющих кондактанс. **(1 час)**

Занятие 9. Адиабатический транспорт в сильных магнитных полях. Применение формализма Ландауэра-Бюттикера для получения основных закономерностей целочисленного эффекта холла. **(1 час)**

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
-------------------------	------------

Подготовка к практическим занятиям.	12
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Л. С. Брагинский, Л. И. Магарилл, М. М. Махмудиан и др. Сборник задач по теории твёрдого тела. — Новосибирск: РИЦ НГУ, 2013., ISBN 978-5-4437-0199-8 (13 экз)
2. О. В. Лоунасамаа. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. — М.: Мир, 1977. (2 экз.)
3. **Кейдж, Марвин Е.** Квантовый эффект Холла. /Под ред. Р. Пренджа и С Гирвина. — М.: Мир, 1989., ISBN 5030010475 (1 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

4. Квантовый транспорт в низкоразмерных полупроводниковых структурах: учеб. программа / А. Г. Погосов, Д. А. Похабов; Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. — 14 с., 0,8 усл. печ. л., ISBN 978-5-4437-0932-1.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Интернет-ресурсы:

- сайт кафедры физики полупроводников физического факультета НГУ (<http://www.phys.nsu.ru/departament/index.php/chairs/fpp>)

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль успеваемости

Текущий контроль успеваемости осуществляется на практических занятиях преподавателем при решении студентом задач, рекомендованных для практических занятий и домашних заданий, обсуждаются идеи и способы решения. Одновременно с этим проводятся индивидуальные консультации обучающихся.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Он проводится в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Оценка знаний, умений, навыков и освоения компетенций обучающимися в рамках текущего и промежуточного контроля проводится согласно шкале и критериям оценивания:

«неудовлетворительно». Обучающийся знает отрывки дисциплины, которые может воспроизвести по памяти. Однако, не понимает физических принципов, лежащих в основе рассматриваемых явлений, не может восстановить связи различных частей, составляющих единое целое. Компетенции не сформированы, требуется повторное прохождение дисциплины.

«удовлетворительно». Обучающийся может по памяти воспроизвести различные аспекты дисциплины в том виде, в каком они были изложены решать простые типовые задачи, однако, не

может правильно ответить на дополнительные вопросы, нацеленные на выявление умения сопоставлять различные аспекты дисциплины, активно владеть изложенным материалом для решения более сложных задач. Достигнут пороговый уровень освоения компетенций.

«хорошо». Обучающийся освоил различные аспекты дисциплины, понимает их физическую сущность, умеет выводить рассматриваемые положения из лежащих в основе физических законов и принципов, раскрывать взаимосвязь частей, составляющих единое целое, решать типовые задачи. Однако, не может правильно ответить на дополнительные вопросы, нацеленные на выявление умения применить полученные знания для решения задач, непосредственно относящихся к дисциплине, но не разобранных в предлагаемом виде во время обучения. Достигнут базовый уровень освоения компетенций.

«отлично». Обучающийся владеет знаниями и умениями, относящимися к дисциплине, ясно и определённо отвечает на вопросы, понимает физическую сущность рассматриваемых явлений, умеет выводить рассматриваемые положения из лежащих в основе физических законов и принципов, легко находит взаимосвязь частей, составляющих единое целое, имеет представление об области применимости используемых физических положений, правильно отвечает на дополнительные вопросы, нацеленные на выявление умения применять полученные знания для решения новых задач. Достигнут продвинутый уровень освоения компетенций.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Критерии и шкалы оценивания индикаторов достижения результатов обучения отражены в Таблице 10.2.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и способы постановки и решения задач исследования полупроводниковых низкоразмерных структур с помощью явлений квантового транспорта, понимать принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной криогенной техники; базовые разделы физики конденсированного состояния, физики полупроводников, баллистических и квантовых явлений в низкоразмерных полупроводниковых системах.	Решение заданий, экзамен.
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь делать качественные оценки характерных величин рассматриваемых физических эффектов; решать задачи из приложенных заданий.	Решение заданий, экзамен.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Квантовый транспорт в низкоразмерных полупроводниковых структурах».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<u>Экзамен:</u> – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы. При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить не принципиальные неточности.	<i>Отлично</i>
<u>Экзамен:</u> – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	<i>Хорошо</i>
<u>Экзамен:</u> – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	<i>Удовлетворительно</i>
<u>Экзамен:</u> – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	<i>Неудовлетворительно</i>

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Примеры заданий для самостоятельного решения

Задание № 1

1. Показать, что амплитуда универсальных флуктуаций кондактанса в образце длиной L и шириной W , превышающих длину сбоя фазы электрона L_ϕ , определяется выражением

$$2. \quad \delta G \approx \frac{e^2}{h} \left(\frac{L_\phi}{L} \right)^{3/2} \left(\frac{W}{L_\phi} \right)^{1/2}.$$

3. Найти асимптотики функции Гелл-Мана — Лоу $\beta(G) = \partial \ln G / \partial \ln L$ (L — характерный размер образца) в случае больших и малых значений кондактанса G .
4. Найти поправку к функции Гелл-Мана — Лоу, связанную со слабой локализацией. Какой вывод можно сделать на основе полученного ответа относительно возможности перехода металл-диэлектрик в двумерном случае?
5. Как будут изменяться осцилляции Ааронова — Бома в кольцевом интерферометре, если увеличивать его внешний диаметр при неизменном внутреннем? При каком внешнем диаметре осцилляции исчезнут?

Задание № 2

1. Показать, что кондактанс проводника с коэффициентом прохождения T равен $G = (2e^2/h)MT$, где M — число мод поперечного квантования в подводящих контактах, которые предполагаются идеальными.

2. Показать, что при последовательном соединении проводников с коэффициентами прохождения T_i величина, вносящая аддитивный вклад в полное сопротивление, есть

$$G_i^{-1} = \frac{h}{2e^2} \frac{1 - T_i}{T_i}.$$

3. Доказать, что матрица коэффициентов полной проводимости $\hat{g}$ произвольного многополюсника в магнитном поле обладает следующими свойствами:

4. а) $g_{ij}(B) = g_{ji}(-B)$;

5. б) $\sum_i g_{ij} = \sum_j g_{ij} = 0$;

6. в) алгебраические дополнения D_{ij} всех элементов матрицы $\hat{g}$ равны между собой $D_{ij} \equiv D$;

7. г) $D(B) = D(-B)$.

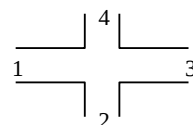
8. Для баллистического проводника в форме перекрестка (см. рис.) в перпендикулярном магнитном поле доказать, что

$$9. \quad R_H \equiv R_{13,24} = \frac{h}{2e^2} \frac{T_R - T_L}{T_R^2 + T_L^2 + 2T_F(T_F + T_R + T_L)},$$

10. где $T_F \equiv T_{31}$, $T_R \equiv T_{21}$, $T_L \equiv T_{41}$ — соответствующие коэффициенты прохождения.

11. Используя модель краевых токовых состояний, получить квантование холловского сопротивления $R_H = h/ne^2$ для двумерного электронного газа в холловском мостике (6-полюснике).

12. В туннельной структуре с двумя барьерами найти ограничения на туннельную прозрачность барьеров для наблюдения эффекта кулоновской блокады.



Вопросы на экзамен

1. Методы получения низких температур 70 К — 0.3 К.
2. Скейлинговая теория локализации.
3. Методы получения температур ниже 0.3 К. Рефрижератор растворения.
4. Слабая локализация. Квантовые поправки к проводимости.
5. Переход металл-диэлектрик в модели Андерсона. Рассуждения Таулесса о масштабировании.
6. Подавление квантовых поправок к проводимости магнитным полем.
7. Переход Мотта.
8. Модель Бюттикера-Ландауэра.
9. Баллистический транспорт. Квантование кондактанса баллистического микроконтакта.
10. Краевые токовые состояния. Квантовый эффект Холла.
11. Наноструктуры и методы их изготовления.
12. Мезоскопика. Универсальные флуктуации кондактанса.
13. Кулоновская блокада туннелирования.
14. Дробный квантовый эффект Холла.

Пример билета на экзамен

1. Баллистический транспорт. Квантование кондактанса баллистического микроконтакта.
2. Краевые токовые состояния. Квантовый эффект Холла.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.