

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Квантовая физика низкоразмерных систем
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет  
2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.  
семинары: 60 час.  
лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.М. Пудалов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и технологии наноструктур 24.05.2022

## Аннотация

В данном курсе рассматриваются физические свойства электронных систем пониженной размерности (2, 1 и 0) и наноструктур на их основе. Эта область науки изобилует Нобелевскими открытиями, поэтому в данном курсе рассматриваются также концепции, лежащие в основе открытий и сами открытия. В курсе излагаются основы квантового транспорта заряда и спиновых свойств электронов, свойства Ферми-жидкостного состояния (FL) и фаз за пределами FL. Курс рассчитан на студентов-магистров ЛФИ (МФТИ), в основном, экспериментаторов. Излагаемые материалы иллюстрируются описанием ключевых экспериментов и их результатов.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

освоение студентами фундаментальных знаний в области квантовых электронных свойств систем пониженной размерности и наноструктур на их основе, фундаментальных эффектов проявляющихся в низкоразмерных системах, Нобелевских открытий XX и XXI века, лежащих в основе квантовой физики низкоразмерных систем, изучение способов создания нанoeлектронных устройств и методов их исследования, а также областей их практического применения.

#### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области квантовой физики низкоразмерных (2d и 1d) систем как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности в области нанoeлектроники и спинтроники;
- понимание ключевых физических эффектов, открытий, экспериментов и теоретических результатов, лежащих в основе современного описания свойств низкоразмерных систем;
- ознакомление студентов с принципами создания устройств нанoeлектроники и спинтроники, их функционирования на основе квантовых эффектов, выявление особенностей их функциональных характеристик в сравнении с классическими микроэлектронными устройствами;
- формирование подходов к выполнению студентами исследований в области свойств низкоразмерных квантовых материалов и структур в рамках выпускных работ на степень магистра, формирование базовых знаний и умений для дальнейших исследований в рамках выпускных квалификационных работ.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения

УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
	УК-5.2 Способен определять теоретическое и практическое значение культурно-языкового фактора при взаимодействии различных философских и научных традиций
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость

на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

1. Современные проблемы физики конденсированного состояния
2. Новейшие открытия в физике, в т.ч., в квантовой физике твердого тела
3. О взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук
4. Теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния
5. Принципы симметрии, топологии, и законы сохранения
6. Основные методы создания наноструктур и наноматериалов, требуемые для исследований в низкотемпературных экспериментах.
7. Основные методы создания и принципы функционирования устройств наноэлектроники и спинтроники.
8. Научные задачи, над которыми работают в базовых лабораториях образовательной программы.
9. Технику безопасности и правила работы в низкотемпературных физических экспериментах и в экспериментах с сильными магнитными полями.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические знания: понятия, результаты, гипотезы, законы;
- представлять панораму универсальных методов и законов современной квантовой физики низкоразмерных систем;
- абстрагироваться от несущественных факторов при моделировании реальных физических процессов и явлений;
- делать численные оценки масштаба ожидаемых эффектов;
- планировать оптимальное проведение экспериментов для решения поставленных задач.

владеть:

- Теоретическими основами экспериментальных методов проведения измерений в области квантовой физики низкоразмерных систем с использованием транспортных, туннельных, термодинамических, ВЧ, оптических и резонансных методов.
- Информацией о современном состоянии исследований в области квантовой физики твердого тела.
- Теоретическими моделями фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
- Методами анализа и обработки экспериментальных данных.

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

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Необходимые сведения из квантовой механики. Реализация двумерных, одномерных и нуль-мерных систем		2		1
2	Статистика состояний в системах различной размерности. Характерные масштабы энергии, длин и времен в мезоскопии. Локализованные и протяженные состояния различной симметрии		2		1
3	Квантовый баллистический транспорт (1). Квантовый баллистический транспорт в слабом магнитном поле (2). Незатухающие токи		2		1

4	Квазиклассическая динамика электронов в магнитном поле		2		1
5	Квантовый баллистический транспорт в квантующем магнитном поле (3). Квантовый эффект Холла		2		1
6	Транспорт не зонного типа		2		1
7	Необходимые сведения из сверхпроводимости		2		1
8	Баллистический транспорт в структурах NS и SNS		2		1
9	Нуль-мерные системы. Кулоновская блокада		2		1
10	Квантовый диффузионный транспорт (1)		2		1
11	Квантовый диффузионный транспорт (2). Квантующее магнитное поле. Целочисленный квантовый эффект Холла		2		1
12	Представление о композитных фермионах и дробный квантовый эффект Холла		4		2
13	Спин-орбитальное взаимодействие. Спин-орбитальное расщепление спектра в двумерных системах. Спектр Рашбы		4		2
14	Спиновый эффект Холла. Управление потоками спинов. Детектирование спиновой намагниченности		2		2
15	Квантовый эффект Холла. Топологическое рассмотрение		2		2
16	Экспериментальные методы исследования электронного спектра		2		2
17	Многочастичные эффекты. Ферми газ и Ферми жидкость. Основы теории Ландау Ферми жидкости		2		3
18	Эффекты электрон-электронного взаимодействия в транспорте заряда и в термодинамике		2		3
19	Нахождение энергии основного состояния. Приближение Хартри-Фока		2		3
20	Термодинамическая плотность состояний во взаимодействующей системе. Вигнеровская кристаллизация. Классическое и квантовое плавление		2		3
21	Введение в магнетизм низкоразмерных систем. Теорема Мермина-Вагнера		4		3
22	Рассеяние магнитными примесями. Эффект Кондо		4		3
23	Одномерные и квазиодномерные системы. Неустойчивость зарядовом канале (CDW). Неустойчивость в спиновом канале (SDW)		4		3
24	Многочастичные эффекты и фазовое расслоение в низкоразмерных системах		4		3
Итого часов			60		45
Подготовка к экзамену		30 час.			

## 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

## Семестр: 1 (Осенний)

## 1. Необходимые сведения из квантовой механики. Реализация двумерных, одномерных и нуль-мерных систем

Напоминание основных начал квантовой механики - описания свойств электронов в терминах волн и частиц, качественная роль и способы задания граничных условий частицы в потенциальной яме. Физические причины размерного квантования уровней энергии. Вырождение уровней по энергии. Основные экспериментальные способы реализации двумерных и одномерных систем. Формирование двумерных систем электронов на границе кремния и окисла кремния, над поверхностью криогенных диэлектриков, а также в гетероструктуре GaAs-AlGaAs. Рассмотрена работа кремниевого полевого транзистора в линейном и нелинейном режимах. Описаны способы изготовления одномерных и нуль-мерных систем.

## 2. Статистика состояний в системах различной размерности. Характерные масштабы энергии, длин и времен в мезоскопике. Локализованные и протяженные состояния различной симметрии

Рассмотрены причины квантования импульса накладываемые граничными условиями. Подсчитывается плотность состояний Ферми-частиц в импульсном пространстве и по энергии для систем различной размерности. Проводятся оценки Фермиевской энергии, Фермиевской скорости для простых монокристаллических металлов с одним электроном на атом, для типичных двумерных систем. Обсуждается физический смысл различных параметров двумерных систем: длина тепловой диффузии, длина релаксации импульса, длина свободного пробега, длина релаксации энергии, энергия Таулесса. Проводятся оценки характерных значений параметров для двумерных систем электронов: Фермиевской длины волны, длины волны, длины релаксации импульса. Проводится качественное рассмотрение характеристик Ферми-газа электронов в металлах - теплоемкости, проводимости, теплопроводности.

## 3. Квантовый баллистический транспорт (1). Квантовый баллистический транспорт в слабом магнитном поле (2). Незатухающие токи

Обсуждаются основные понятия и свойства квантового баллистического транспорта в двумерной системе. Приведен вывод формулы Ландауэра на качественном уровне. Рассмотрены эффекты Аронова-Бома (АВ) и Альтшулера-Аронова-Спивака. Обсуждаются ключевые эксперименты по проверке теорий. Рассмотрены интерференционные эффекты в баллистическом транспорте.

## 4. Квазиклассическая динамика электронов в магнитном поле

Рассмотрена динамика электронов в двумерной системе в перпендикулярном магнитном поле. Рассмотрена задача о уровнях энергии и волновых функциях электронов в двумерной системе в квантующем перпендикулярном магнитном поле. Рассматривается статистика состояний, энергетическая плотность состояний, уровни Ландау в двумерной системе. Основные наблюдаемые эффекты - циклотронный резонанс, квантовые магнитоосцилляции. Обсуждаются характерные масштабы в задаче с магнитным полем.

## 5. Квантовый баллистический транспорт в квантующем магнитном поле (3). Квантовый эффект Холла

Рассмотрен квантовый баллистический транспорт в присутствии магнитного поля. Основные эффекты, предшествующие установлению современной теории - фокусировка электронов в магнитном поле, магнитные поверхностные уровни, “скачущие вдоль поверхности электроны”, размерная отсечка квантовых осцилляций. Рассмотрен квантовый эффект Холла в баллистическом приближении, краевые состояния и нелокальный транспорт. Продолжено рассмотрение квантового баллистического транспорта в слабом магнитном поле с учетом граничных периодических условий. Незатухающие токи в несверхпроводящих мезоскопических кольцах. Рассмотрена фазовая диаграмма в координатах энергия – магнитный поток. Свойства массивов мезоскопических колец.

#### 6. Транспорт не зонного типа

Рассмотрен зарядовый транспорт не зонного типа, включая туннельный и прыжковый транспорт. Резонансное туннелирование. Примесные уровни энергии в легированных полупроводниках. Прыжковая проводимость. Проводимость с переменной длиной прыжка. Кулоновская щель.

#### 7. Необходимые сведения из сверхпроводимости

Даны необходимые сведения из сверхпроводимости. Возникновения куперовских пар, электрон-фононное взаимодействие, природа спаривания. Волновая функция. Синглетное состояние. Энергетическая плотность состояний в сверхпроводнике. Длина когерентности. Сверхпроводники первого и второго рода. Эффект Мейснера, смешанное состояние. Магнитные свойства сверхпроводников первого и второго рода.

#### 8. Баллистический транспорт в структурах NS и SNS

Рассмотрен баллистический транспорт в структурах NS и SNS. Андреевское отражение квазичастиц при прохождении через границу. Транспорт в структурах NIS, SNS, SIS. Транспорт в баллистическом и диффузионном пределе. Туннелирование куперовских пар. Эффект Джозефсона. Способы измерения энергетической щели в сверхпроводнике.

#### 9. Нуль-мерные системы. Кулоновская блокада

Рассматривается баллистический перенос заряда через нульмерную систему. Явление кулоновской блокады. Одноэлектронный транзистор, квантовый насос заряда. Зарядовые эффекты в транспорте в нормальных и сверхпроводящих структурах.

#### 10. Квантовый диффузионный транспорт (1)

Рассматриваются основы транспорта в диффузионном приближении. Рассеяние на примесях и фононах. Тау-приближение. Классическая формула Друде и противоречия. Квазиклассическая теория Зоммерфельда. Неупорядоченные системы. Квантовые эффекты интерференции в транспорте. Слабая локализация. Отрицательное магнитосопротивление. Локализация Андерсона. Скейлинговая теория локализации. Аналогия в оптике.

#### 11. Квантовый диффузионный транспорт (2). Квантующее магнитное поле. Целочисленный квантовый эффект Холла

Рассмотрен диффузионный транспорт в квантующем магнитном поле. Квантование потока. Целочисленный квантовый эффект Холла в диффузионном приближении. Локализованные и протяженные состояния. Тип симметрии и статистика уровней. Волновая функция электронов. Термодинамика и транспортные свойства в режиме квантования холловской проводимости.

#### 12. Представление о композитных фермионах и дробный квантовый эффект Холла

Представление о композитных фермионах и дробный квантовый эффект Холла. Состояния с полуцелым заполнением уровней Ландау. Топологические инварианты. Числа Черна. Топологический изолятор. Квантовый эффект Холла в 3D системе.



13. Спин-орбитальное взаимодействие. Спин-орбитальное расщепление спектра в двумерных системах. Спектр Рашбы

Рассмотрено спин-орбитальное взаимодействие, его физическая причина. Спин-орбитальное расщепление спектра в двумерных системах. Спектр типа Рашбы.

Семестр: 2 (Весенний)

14. Спиновый эффект Холла. Управление потоками спинов. Детектирование спиновой намагниченности

Рассмотрен аномальный эффект Холла, спиновый эффект Холла. Рассмотрены основы спинтроники - способы управления потоками спинов и способы детектирования спиновой намагниченности транспортными и оптическими методами.

15. Квантовый эффект Холла. Топологическое рассмотрение

Рассматривается квантовый эффект Холла с топологической точки зрения. Введение в квантовые топологические инварианты. Фаза Берии. Числа Черна.

16. Экспериментальные методы исследования электронного спектра

Рассмотрены экспериментальные методы исследования электронного спектра. Квантовые осцилляции в двумерных системах. Измерение орбитального и спинового расщепления уровней Ландау, квантовых осцилляций сопротивления, химического потенциала, намагниченности и энтропии. Полная спиновая поляризация. Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением.

17. Многочастичные эффекты. Ферми газ и Ферми жидкость. Основы теории Ландау Ферми жидкости

Рассматриваются многочастичные эффекты в электронной системе. Излагаются основы теории Ландау Ферми жидкости. Золотое правило Ферми. Перенормировка параметров квазичастиц. Сингулярность ван-Хова и эффект Померанчука. Перенормировка функции заполнения квазичастиц.

18. Эффекты электрон-электронного взаимодействия в транспорте заряда и в термодинамике

Рассматривается проявление эффектов электрон-электронного взаимодействия в транспорте заряда и термодинамике. Когерентные квантовые эффекты в рассеянии. Перенормировка уширения уровней энергии и плотности состояний. Спиновая намагниченность и восприимчивость низкоразмерных систем. Методы ее измерения и результаты. Стонеровская неустойчивость. Определение перенормированных параметров квазичастиц из экспериментов.

19. Нахождение энергии основного состояния. Приближение Хартри-Фока

Вычисление энергии основного состояния. Приближение Хартри-Фока. Модель Хаббарда. Основы приближения среднего поля и метода DFT.

20. Термодинамическая плотность состояний во взаимодействующей системе. Вигнеровская кристаллизация. Классическое и квантовое плавление

Термодинамическая плотность состояний во взаимодействующей системе. Сжимаемость, изменение ее знака. Влияние беспорядка. Влияние числа квантовых степеней свободы. Заряженная Ферми-жидкость. Вигнеровская кристаллизация. Классическое и квантовое плавление вигнеровского кристалла.

## 21. Введение в магнетизм низкоразмерных систем. Теорема Мермина-Вагнера

Введение в магнетизм низкоразмерных систем. Теорема Мермина-Вагнера.

## 22. Рассеяние магнитными примесями. Эффект Кондо

Рассматривается рассеяние электронов магнитными примесями. Локализованные моменты. Эффект Кондо.

## 23. Одномерные и квазиодномерные системы. Неустойчивость зарядового канала (CDW). Неустойчивость в спиновом канале (SDW)

Введение в физику одномерных и квази-одномерных систем. Органические кристаллы. Неустойчивость в зарядовом канале. Переход Пайерлса. Волна зарядовой плотности. Неустойчивость в спиновом канале. Квантование вектора нестинга и индуцированная полем волна спиновой плотности.

## 24. Многочастичные эффекты и фазовое расслоение в низкоразмерных системах

Многочастичные эффекты фазового расслоения в двумерных и одномерных системах. Проявления фазового расслоения в различных системах и в различных экспериментах.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Компьютер, проектор, доска.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Электронные свойства двумерных систем [Текст] = Electronic properties of two-dimensional systems/Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн, -М., Мир, 1985
2. Электроны в неупорядоченных средах [Текст] / В. Ф. Гантмахер учеб. пособие для вузов - М. Физматлит, 2003

### Дополнительная литература

1. Квантовый эффект Холла [Текст] = The quantum Hall effect, монография/М. Кейдж [и др.], -М., Мир, 1989
2. Введение в мезоскопическую физику [Текст]/Й. Имри, -М., Физматлит, 2002
3. Квазичастицы в физике конденсированного состояния [Текст]/Н. Б. Брандт, В. А. Кульбачинский, -М., Физматлит, 2007
4. Введение в физику сверхпроводников [Текст]/В. В. Шмидт, -М., МЦНМО, 2000

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Электронные ресурсы, включая доступ к базам данных SCOPUS, E-library

Информационные ресурсы: Журналы: Успехи физических наук, Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, Physical Review B, Review of Modern Physics. и др.), база данных ArXiv, доступные через Internet научные и научно-технические журналы, электронные конспекты лекций, включающие перечень контрольных задач, разработанные для данного курса

1. J. Davies, The Physics of Low dimensional semiconductors, Cambridge Univ. Press, 1998.
2. [T. Ando, A.B. Fowler, F. Stern, Electronic properties of two-dimensional systems, Rev. Mod. Phys. 54, 437 (1982)].

3. T.Ando, Y.Arakawa K.Furuya, S.Komiyama, H.Nakashima, Mesoscopic Physics and Electronics, 2nd edition (Springer,2008).
4. УФН, Т.170, №3 (2000). (Нобелевские лекции по физике) Р.Б. Лафлин – Дробное квантование, стр. 292-303; Х.Штермер - Дробный квантовый эффект Холла, стр. 304-319; Д.Цуи - Соотношение беспорядка и взаимодействия в двумерном электронном газе, помещенном в сильное магнитное поле, стр.320-325
5. С. Гирвин, Квантовый эффект Холла, пер. с англ., М.-Ижевск, 2003.
6. M. Janssen, et al. Introduction to the Theory of the Integer Quantum Hall Effect, Ed. J.Haidu, (VSH, Koeln 1994).
7. К. фон Клитцинг, Квантованный эффект Холла (Нобелевская лекция), пер. с англ., Новое в жизни науки и техники, 1986, № 9, с. 3
8. Fundamental Problems of Mesoscopic Physics. Interaction and Decoherence. Eds. I.V.Lerner, B.A.Altshuler, Y.Gefen, NATO Science Series (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004)
9. X.-L.Qi, S.-C. Zhang, Topological insulators and superconductors, REV. MOD. PHYSICS, 83, 1057 (2011) [ArXiv: 1008.2026 (2010)]
10. Y. Ando, Topological Insulator Materials, Journal of the Physical Society of Japan 82 (2013) 102001
11. L. Fu, C.L. Kane, Topological insulators with inversion symmetry, PHYSICAL REVIEW B 76, 045302 2007
12. M. König, S. Wiedmann, C. Brüne, A. Roth, H. Buhmann, L.W. Molenkamp, X.-L. Qi, S.-C. Zhang, Quantum Spin Hall Insulator States in HgTe Quantum Wells, Science 318, 766 (2007). DOI: 10.1126/science.1148047
13. Пудалов В.М. “Измерения магнитных свойств электронов проводимости”, УФН, 191(1) 3-29 (2021). DOI: 10.3367/UFNr.2020.05.038771
14. Я.В. Фоминов, Н.М. Щелкачев, Эффект Джозефсона, Учебное пособие, кафедра теоретической физики МФТИ (2010)

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Adobe Acrobat, Adobe Reader, Power point. Zoom

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, знать ключевые эксперименты и экспериментальные основы базовых теорий, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.



**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** В.М. Пудалов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

# 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
	УК-5.2 Способен определять теоретическое и практическое значение культурно-языкового фактора при взаимодействии различных философских и научных традиций
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способствовать совершенствованию на основе	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности

способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая физика низкоразмерных систем» обучающийся должен:

### знать:

1. Современные проблемы физики конденсированного состояния
2. Новейшие открытия в физике, в т.ч., в квантовой физике твердого тела
3. О взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук
4. Теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния
5. Принципы симметрии, топологии, и законы сохранения
6. Основные методы создания наноструктур и наноматериалов, требуемые для исследований в низкотемпературных экспериментах.
7. Основные методы создания и принципы функционирования устройств наноэлектроники и спинтроники.
8. Научные задачи, над которыми работают в базовых лабораториях образовательной программы.
9. Технику безопасности и правила работы в низкотемпературных физических экспериментах и в экспериментах с сильными магнитными полями.

### уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические знания: понятия, результаты, гипотезы, законы;
- представлять панораму универсальных методов и законов современной квантовой физики низкоразмерных систем;
- абстрагироваться от несущественных факторов при моделировании реальных физических процессов и явлений;
- делать численные оценки масштаба ожидаемых эффектов;
- планировать оптимальное проведение экспериментов для решения поставленных задач.

### владеть:

- Теоретическими основами экспериментальных методов проведения измерений в области квантовой физики низкоразмерных систем с использованием транспортных, туннельных, термодинамических, ВЧ, оптических и резонансных методов.
- Информацией о современном состоянии исследований в области квантовой физики твердого тела.
- Теоретическими моделями фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
- Методами анализа и обработки экспериментальных данных.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов

Семестр 9.

1. Плотность состояний в системах различной размерности



2. Устройство и работа структуры металл-изолятор-полупроводник
3. Баллистический транспорт. Формула Ландауэра. Проводимость сужений в двумерной системе.
4. Температурная зависимость прыжкового транспорта.
5. Диффузионный транспорт. Формула Друде, Зоммерфельда. Эффект Холла.
6. Квантование Ландау, структура уровней Ландау. Целочисленный квантовый эффект Холла.
7. Дуальность зарядов и квантов потока. Композитные фермионы. Дробное квантование холловской проводимости.
8. Интерференция электронных волн. Слабая локализация. Скейлинговая гипотеза.
9. Энергетический спектр возбуждений в сверхпроводнике. Измерение щели в спектре
10. Туннелирование квазичастиц в переходе N-S, SNS. Андреевское отражение.
11. Туннелирование куперовских пар. Эффект Джозефсона.
12. Спин-орбитальное взаимодействие в 3D, 2D системах. Антилокализация.
13. Спиновый эффект Холла. Аномальный эффект Холла
14. Волновая функция электронов на уровне Ландау.
15. Волновая функция Лафлиновских квазичастиц с дробным зарядом.
16. Связь заряда квазичастиц и кванта потока. Мысленный эксперимент Лафлина

#### Семестр 10.

17. Спектр Рашбы
18. Фаза Берии. Числа Черна
19. Основы теории Ферми жидкости. Эффект Померанчука. Перенормировка параметров квазичастиц
20. Методы экспериментального исследования электронного спектра. Эффект де Гааза ван Альфена и Шубникова-де Гааза.
21. Отрицательная сжимаемость двумерной Ферми жидкости
22. Вигнеровская кристаллизация. Стонеровская неустойчивость
23. Неустойчивость Пайерлса. Волна зарядовой плотности
24. Волна спиновой плотности. Квантование вектора нестинга в магнитном поле.

#### Примеры контрольных заданий

1. Вывести формулу для зависимости энергии электрона от ширины квантовой ямы
2. Вывести формулы для зависимости электронной плотности состояний от энергии в системах различной размерности
3. Чем определяется период квантовых осцилляций
4. Формула Ландауэра
5. На каком расстоянии находятся уровни размерного квантования в гармоническом потенциале
6. Нарисовать и обосновать графический вид эквивалентных потенциалов в режиме квантового эффекта Холла для образца (а) Холловской геометрии и (б) для диска Корбино.

#### Примеры экзаменационных билетов (семестр 10)

##### Билет 1.

1. В полупроводниковом образце выращены две квантовые ямы с двумерными электронными слоями, параллельно друг другу, с тонким потенциальным барьером между ними. В одном слое находятся электроны, в другом – дырки. К этим слоям методом диффузии приделаны сильно легированные контакты, так что в результате слои оказались соединены параллельно друг с другом. Концентрации носителей в обоих слоях одинаковы. Весь образец помещен в перпендикулярное магнитное поле в условия квантового эффекта Холла. Докажите и изобразите качественно, как будет изменяться с магнитным полем диагональная и холловская компоненты сопротивления.
2. Изобразить графически зависимости  $\sigma_{xx}$  от  $\sigma_{xy}$  (или от фактора заполнения  $\nu$ ) для двумерной системы в режиме дробного квантового эффекта Холла в интервале факторов заполнения  $\nu=0 - 1$ .
3. Образец – 2D система электронов холловской геометрии, шириной  $W$  и длиной  $L$ - помещен в режим КЭХ и через него пропускается слабый ток.

(в) В магнитном поле 4 Тесла сопротивление образца S-D примерно равно 6,5 кОм. Оценить концентрацию электронов в образце.

(г) Какова вольт-амперная характеристика диска Корбино в условиях КЭХ

4. Вывести формулу для скачка теплоемкости при температуре  $T_c$  - критической температуре перехода сверхпроводника в нормальное состояние.

Билет 2.

1. Вывести формулу для числа состояний на уровне Ландау. Объяснить ее физический смысл.

(а) Двумерная структура помещена в перпендикулярное поле 4 Тесла.

(б) Холловское сопротивление оказалось равным 6,45 кОм. Найти концентрацию электронов в 2D слое в (100) Si и в GaAs?

2. Объяснить физическую причину классического эффекта Холла и аномального эффекта Холла.

3. Написать температурную зависимость проводимости двумерной системы в отсутствие магнитного поля: (а) в классическом случае, (б) с учетом квантовых интерференционных поправок. К двумерной системе приложено слабое (т.е.  $\omega \tau \ll 1$ ) магнитное поле, перпендикулярное ее поверхности. Оценить (а) в каком интервале полей можно ожидать влияния магнитного поля на удельное сопротивление системы, и (б) на какую величину оно изменится при приложении поля.

4. Доказать выполнение законов сохранения энергии, импульса и заряда в процессе андреевского отражения.

(а) На  $dI/dV$  характеристике структуры S-N-S (где S-однозонный сверхпроводник) наблюдаются резкие провалы при приложенном напряжении  $V = 5\text{ мВ}, 3,3\text{ мВ}, 2,5\text{ мВ}, 2\text{ мВ}$ . Можно ли из этого измерения оценить величину щели в спектре сверхпроводника. Если да, то какова величина щели?

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Экзамен проводится в письменной форме по билетам с дополнительной устной беседой. В каждом билете экзамена представлены четыре вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.