

**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**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Введение в теорию неупорядоченных систем
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем теоретической физики
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.С. Иоселевич, д-р физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем теоретической физики 26.04.2021

Аннотация

Курс лекций посвящен, в основном, электронным свойствам неупорядоченных материалов. Подробно рассматриваются свойства различных систем в диэлектрической фазе (хвосты плотности состояний, прыжковая проводимость, кулоновская щель). Обсуждаются эффекты слабой локализации в металлической фазе (магнитосопротивление, сбой фазы, размерные эффекты), а также свойства волновых функций вблизи локализационного перехода; описываются некоторые мезоскопические эффекты. Для успешного усвоения курса обучающимся предполагается хорошее знакомство с квантовой механикой и физикой твердого тела, а также свободное владение стандартной математикой.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изучение электронных свойств неупорядоченных материалов;
- подробное рассмотрение свойств различных систем в диэлектрической фазе (хвосты плотности состояний, прыжковая проводимость, кулоновская щель);
- обсуждение эффектов слабой локализации в металлической фазе (магнитосопротивление, сбой фазы, размерные эффекты), а также свойств волновых функций вблизи локализационного перехода;
- описание некоторых мезоскопических эффектов.

Задачи дисциплины

- познакомить студентов с основными понятиями и идеями в этой области, с постановкой задач и подходами к их решениям. Предполагается, что прослушав этот курс, студенты смогут читать и понимать текущую научную периодику в этой области.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	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-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	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-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и 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-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	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-5.3 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-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- основные понятия по теме дисциплины.

уметь:

- пользоваться развитыми в рамках дисциплины методами исследования, решать задачи по теме дисциплины.

владеть:

- математическим и понятийным аппаратом и методами исследований, составляющими содержание дисциплины.

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	Беспорядок в кристаллах. Невзаимодействующие электроны: модель Андерсона. Плотность состояний в модели Андерсона - продолжение.	6	6		9
2	Корреляционные эффекты в слабо легированном полупроводнике. Эффекты подбарьерного рассеяния в прыжковой проводимости. Локализационный переход.	6	6		9
3	Реалистическая модель: слабо легированный полупроводник. Прыжковая проводимость. Прыжковое магнитосопротивление.	6	6		9
4	Хвосты плотности состояний для случая гауссова случайного потенциала. Метод оптимальной флуктуации. Хвосты плотности состояний - продолжение. Модель Лифшица.	6	6		9
5	Эффекты слабой локализации. Процессы, приводящие к сбою фазы. Мезоскопика.	6	6		9
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Беспорядок в кристаллах. Невзаимодействующие электроны: модель Андерсона. Плотность состояний в модели Андерсона - продолжение.

Беспорядок в кристаллах.

- Динамический и замороженный беспорядок: усреднение по времени и усреднение по ансамблю.
- Кристаллы, жидкости, стекла, сплавы, магнитные системы. Дальний и ближний порядок.

Невзаимодействующие электроны: модель Андерсона.

- Различные варианты модели Андерсона
- Плотность состояний: общие свойства.
- Плотность состояний: сильный беспорядок, локализованные состояния.
- Плотность состояний: слабый беспорядок, плоские волны и их слабое рассеяние.

Плотность состояний в модели Андерсона –продолжение.

- Модель Ллойда: точное выражение для средней плотности состояний.
- Экспоненциально малая плотность состояний в модели Андерсона вблизи границы спектра: идея оптимальной флуктуации.
- Развитие идеи оптимальной флуктуации, определение численного фактора в показателе экспоненты.

2. Корреляционные эффекты в слабо легированном полупроводнике. Эффекты подбарьерного рассеяния в прыжковой проводимости. Локализационный переход.

Корреляционные эффекты в слабо легированном полупроводнике.

- Эффекты электрон-электронного взаимодействия: пошаговая процедура минимизации классической электростатической энергии.
- Первое приближение: фермиевское заполнение одночастичных состояний.
- Второе приближение: парные корреляции. Кулоновская щель в плотности состояний. Роль высших приближений.
- Различные сценарии многочастичных эффектов в проводимости.
- Закон Эфроса-Шкловского для проводимости с переменной длиной прыжка.

Эффекты подбарьерного рассеяния в прыжковой проводимости.

- Влияние подбарьерного рассеяния на декремент локализованной волновой функции.
- Подавление положительного магнитосопротивления подбарьерным рассеянием.
- Интерференционные явления: эффект Ааронова-Бомы, отрицательное магнитосопротивление.

Локализационный переход.

- Андерсоновская локализация в модели Андерсона. Край подвижности. Локализованные и делокализованные состояния: чем они отличаются друг от друга?
- Структура волновых функций вблизи порога подвижности. Длина локализации. Мультифрактальность.

3. Реалистическая модель: слабо легированный полупроводник. Прыжковая проводимость. Прыжковое магнитосопротивление.

Реалистическая модель: слабо легированный полупроводник.

- Доноры и акцепторы. Случайный потенциал и плотность состояний в случае малой и большой степени компенсации.
- Механизмы переноса заряда в слаболегированном полупроводнике.
- Умеренно низкие температуры: качественное описание прыжковой проводимости по ближайшим соседям.
- Очень низкие температуры: качественное описание проводимости с переменной длиной прыжка.

Прыжковая проводимость.

- Прыжки электронов между примесями, сопровождаемые поглощением или излучением фононов. Сетка сопротивлений Миллера-Абрахамса.
- Применение теории перколяции. Зависимость проводимости от температуры и концентрации примесей в режиме проводимости по ближайшим соседям.
- Проводимость с переменной длиной прыжка, закон Мотта.
- Качественный вывод (для различных размерностей d). Эффективная $d+1$ -мерная перколяционная модель и количественный вывод закона Мотта.

Прыжковое магнитосопротивление.

- Туннелирование в магнитном поле. Квазиклассический характер волновых функций и деформация “поверхностей постоянного действия” магнитным полем.
- Модификация сетки Миллера-Абрахамса в магнитном поле и вычисление магнитосопротивления с помощью теории перколяции. Пределы слабого и сильного полей. Анизотропия магнитосопротивления.
- Магнитосопротивление в режиме проводимости с переменной длиной прыжка.

4. Хвосты плотности состояний для случая гауссова случайного потенциала. Метод оптимальной флуктуации. Хвосты плотности состояний - продолжение. Модель Лифшица.

Хвосты плотности состояний для случая гауссова случайного потенциала. Метод оптимальной флуктуации.

- Гауссов случайный потенциал, корреляционная функция и корреляционный радиус, определение средней плотности состояний.
- Метод оптимальной флуктуации, формулировка общей задачи на условный экстремум, вывод нелинейного уравнения Шредингера.
- Случай белого шума (“ближний хвост”), сведение к универсальной безразмерной задаче.
- Случай белого шума: точное решение в одномерном случае.

Хвосты плотности состояний – продолжение.

- Случай плавного потенциала (“дальний хвост”) – точное решение.
- Предэкспоненциальный множитель в средней плотности состояний: построение Гауссова функционального интеграла.
- Полносимметричная мода, нулевые моды и их вклад в предэкспоненциальный множитель.

Модель Лифшица.

- Построение модели. Металлический и диэлектрический пределы.
- Спектр, собственные состояния и плотность состояний в металлическом случае.
- Спектр и собственные состояния в диэлектрическом случае. Парное приближение, резонансные и нерезонансные уровни.
- Плотность состояний в диэлектрическом пределе. Случай большого парного расщепления (“ближний хвост”).
- “Дальний хвост” и коллективные оптимальные флуктуации.
- Центральный провал в плотности состояний.
- Плотность состояний при очень малых энергиях: неприменимость парного приближения.

5. Эффекты слабой локализации. Процессы, приводящие к сбою фазы. Мезоскопика.

Эффекты слабой локализации.

- Пределы применимости классической теории проводимости металлов. Квантовая интерференция актов рассеяния (качественное рассмотрение). Самопересекающиеся пути и их вклад в интерференционные члены.
- Диффузионный пропагатор и его физическая интерпретация.
- Последовательность диаграмм, отвечающая первой квантовой поправке: Куперон и его физическая интерпретация.

- Расходимость квантовой поправки к проводимости в пространстве низкой размерности. Процессы сбоей фазы и инфракрасное обрезание.
- Граничные условия для Куперона и размерные эффекты. Размерный кроссовер.
- Отрицательное магнитосопротивление: вывод и физическая интерпретация. Осцилляции магнитосопротивления тонкого металлического цилиндра в диффузионном режиме (эксперимент Шарвина и Шарвина).
- Квантовые поправки к кондактансу диффузионного S-N-S контакта. Роль андреевского отражения.

Процессы, приводящие к сбою фазы.

- Неупругие процессы и их роль в сбое фазы. Время сбоей фазы за счет квазиупругих процессов.
- Электрон-электронные столкновения: баллистический и диффузионный режимы. Применимость теории Ферми-жидкости к грязным металлам.
- Влияние электрон-электронных столкновений на плотность состояний. Аномалия на поверхности Ферми (zero bias anomaly).

Мезоскопика.

- Мезоскопический масштаб. Отсутствие самоусреднения.
 - Когерентный транспорт: Формула Ландауера для проводимости в двухконтактной конфигурации. Роль неупругих процессов.
- Четырехконтактная конфигурация.
- Баллистический кондактанс адиабатического сужения. Квантование кондактанса.
 - Когерентный транспорт: последовательное соединение кондактансов.
 - Неаддитивность сопротивления и одномерная локализация.
 - Параллельное соединение кондактансов.

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

Учебная аудитория, доска, при необходимости медиапроектор, экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Модели беспорядка. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем [Текст] = Models of disorder. The theoretical physics of homogeneously disordered systems / Дж. Займан, - М., Мир, 1982
2. Электроны в неупорядоченных средах [Текст] / В. Ф. Гантмахер - М. Физматлит, 2005
3. Основы теории металлов [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / А. А. Абрикосов. — 2-е изд., доп. и испр. — М. : Физматлит, 2009, 2010. — 600 с.
4. Методы квантовой теории поля в статистической физике [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / А. А. Абрикосов, Л. П. Горьков, И. Е. Дзялошинский, Ин-т теорет. физики им. Л. Д. Ландау. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Добросвет, 1998. — 514 с.
5. Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос, Электронные свойства легированных полупроводников, М.: Наука, (1979).
6. И.М.Лифшиц, С.А.Гредескул, Л.А.Пастур, Введение в теорию неупорядоченных систем, Москва, Физматлит, (1982).
7. B.I.Shklovskii, B.Z.Spivak, Scattering and Interference Effects in Variable Range Hopping Conduction, in: Hopping transport in solids, eds. (M.Pollak and B.I.Shklovskii, pp. 271-348, Springer, (1991).

Дополнительная литература

1. B.L.Altshuler, A.G.Aronov, Electron-electron interactions in disordered Conductors, in: Electron-electron interactions in disordered systems, eds. A.L.Efros, M.Pollak, North-Holland, Amsterdam, (1985).
2. Й.Имри, Введение в мезоскопическую физику, Москва, Физматлит, (2002).

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

chair.itp.ac.ru

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

Представление материала на доске и/или при помощи медиапроектора. Возможно использование ПО для символьных и/или численных вычислений.

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 дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, экзамену.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

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

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем теоретической физики (теоргруппа Горькова)
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	А.С. Иоселевич, д-р физ.-мат. наук, доцент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	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-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	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-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и 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-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов

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-5.3 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-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в теорию неупорядоченных систем» обучающийся должен:

знать:

- основные понятия по теме дисциплины.

уметь:

- пользоваться развитыми в рамках дисциплины методами исследования, решать задачи по теме дисциплины.

владеть:

- математическим и понятийным аппаратом и методами исследований, составляющими содержание дисциплины.

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

Не предусмотрено.

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

Приведены в прикреплённом файле.

Критерии оценивания

Обучающемуся ставится оценка в соответствии с продемонстрированным уровнем подготовки; оценивание производится на усмотрения экзаменатора в соответствии с особенностями дисциплины и следующими критериями:

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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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

При проведении оценивания знаний обучающемуся предоставляется время на подготовку на усмотрение экзаменатора. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.

Перечень типовых задач для проведения промежуточной аттестации обучающихся

0.1 Одномерный электрон в случайном потенциале.

Одномерный электрон с гамильтонианом

$$\hat{H} = -\frac{d^2}{dx^2} + U(x)$$

находится в случайном потенциале, создаваемом одинаковыми короткодействующими отталкивающими центрами, расположенными в случайно выбранных точках x_i :

$$U(x) = \kappa \sum_i \delta(x - x_i), \quad \kappa > 0.$$

Точки x_i распределены по Пуассону со средней плотностью n . Плотность считайте малой: $n = \kappa$.

- Исследуйте спектр электрона E_λ и его волновые функции $\psi_\lambda(x)$ в области энергий $0 < E = \kappa^2$. В частности, определите значения $\psi_\lambda(x_i)$ в точках, где расположены рассеиватели.
- Найдите среднюю плотность состояний при энергиях $0 < E = \kappa^2$ и исследуйте ее асимптотики при $0 < E = n^2$ и при $n^2 = E = \kappa^2$.

0.2 Флуктуации прыжкового сопротивления между двумя большими, но конечными контактами

Рассмотрим двумерную прыжковую проводимость в режиме NNH (прыжки по ближайшим соседям). Пусть к системе подведены два контакта в точках a и b на расстоянии L_{ab} ? $L_{corr}^{(net)}$ друг от друга. Контакты имеют вид идеально проводящих дисков радиуса $r = L_{ab}$. Интуитивно ясно, что величина сопротивления R_{ab} между этими контактами может зависеть от конкретного расположения примесей и флуктуировать от образца к образцу, отклоняясь от значения $R_{ab}^{(hom)}$, которое получается, если рассматривать систему, как непрерывную среду. Исследуйте флуктуации величины R_{ab} при $L_{corr}^{(net)} = r = L_{ab}$. Найдите функцию распределения $F_r(\Delta R)$ величины $\Delta R = R_{ab} - R_{ab}^{(hom)}$. Покажите, что распределение в этом случае гауссово, а флуктуации относительно малы. Найдите их дисперсию.

0.3 Кулоновская щель в пленке

Пленка толщиной l вырезана из слаболегированного ($n_D a^3 = 1$) полупроводника. Исследуйте плотность состояний $\nu_W(\varepsilon)$ (на единицу ее площади) в различных диапазонах энергии

и при различных соотношениях между $r_D = n_D^{-1/3}l$ и $L_{corr}^{(3d)}$. Диэлектрические проницаемости пленки и окружающего пленку пространства считайте одинаковыми.

0.4 Подбарьерное действие в анизотропном случае.

Двумерный электрон со спектром

$$\varepsilon(k) = t[2 - \cos ak_x - \cos ak_y], \quad t > 0,$$

находится в поле короткодействующей притягивающей примеси, расположенной в точке $r = 0$, и образует с ней связанное состояние с энергией $E_0 < 0$ (E_0 отсчитывается от дна зоны, т.е., от минимума $\varepsilon(k)$). Докажите, что волновая функция связанного состояния на больших расстояниях от примеси имеет вид

$$\psi_0(r) \propto \exp\{-\tilde{S}(r, E_0)\}, \quad \tilde{S}(r, E_0) = \frac{r}{a}s(\varphi, \gamma), \quad \gamma = |E_0|/2t,$$

где φ -- угол между направлением вектора r и осью x , и определите явный вид функции $s(\varphi, \gamma)$. Подробно рассмотрите случай слабосвязанного состояния, когда $\gamma = 1$.

0.5 Состояния с малыми энергиями в модели Лифшица.

Опишите устройство наиболее вероятных конфигураций расположения примесей (оптимальных флуктуаций) обеспечивающих возникновение состояний с самыми малыми энергиями $|E| = E_{\min}$ в модели Лифшица.

0.6 Длина свободного пробега электронов в модели Лифшица при большой плотности примесей.

Как мы выяснили, электронные состояния в модели Лифшица при большой плотности примесей ($na^3 \gg 1$) хорошо описываются плоскими волнами. Найдите длину свободного пробега $l(E)$ электрона с энергией E , возникающую за счет рассеяния на остаточных флуктуациях плотности. Покажите, что вблизи края зоны $l(E)$ перестает зависеть от энергии.

0.7 Рассеяние в модели Андерсона при слабом беспорядке

Рассмотрите d -мерный вариант модели Андерсона с "прямоугольным" распределением ε_i , при условии $W = t$. Найдите длину свободного пробега $l(k)$ для частицы с волновым вектором k , Найдите положение порогов подвижности E_m из условия $l: \lambda$, где λ -- длина волны частицы.

Контрольные вопросы к экзамену:

1. Динамический и замороженный беспорядок: усреднение по времени и усреднение по ансамблю.
2. Кристаллы, жидкости, стекла, сплавы, магнитные системы. Дальний и ближний порядок.
3. Различные варианты модели Андерсона
4. Плотность состояний: общие свойства.
5. Плотность состояний: сильный беспорядок, локализованные состояния.
6. Плотность состояний: слабый беспорядок, плоские волны и их слабое рассеяние.
7. Модель Ллойда: точное выражение для средней плотности состояний.
8. Экспоненциально малая плотность состояний в модели Андерсона вблизи границы спектра: идея оптимальной флуктуации.
9. Развитие идеи оптимальной флуктуации, определение численного фактора в показателе экспоненты.
10. Гауссов случайный потенциал, корреляционная функция и корреляционный радиус, определение средней плотности состояний.
11. Метод оптимальной флуктуации, формулировка общей задачи на условный экстремум, вывод нелинейного уравнения Шредингера.
12. Случай белого шума ("ближний хвост"), сведение к универсальной безразмерной задаче.
13. Случай белого шума: точное решение в одномерном случае.
14. Случай плавного потенциала ("дальний хвост") – точное решение.
15. Предэкспоненциальный множитель в средней плотности состояний: построение Гауссова функционального интеграла.
16. Полносимметричная мода, нулевые моды и их вклад в предэкспоненциальный множитель.
17. Построение модели. Металлический и диэлектрический пределы.
18. Спектр, собственные состояния и плотность состояний в металлическом случае.
19. Спектр и собственные состояния в диэлектрическом случае. Парное приближение, резонансные и нерезонансные уровни.

20. Плотность состояний в диэлектрическом пределе. Случай большого парного расщепления (“ближний хвост”)
21. “Дальний хвост” и коллективные оптимальные флуктуации.
22. Центральный провал в плотности состояний.
23. Плотность состояний при очень малых энергиях: неприменимость парного приближения.
24. Доноры и акцепторы. Случайный потенциал и плотность состояний в случае малой и большой степени компенсации.
25. Механизмы переноса заряда в слаболегированном полупроводнике.
26. Умеренно низкие температуры: качественное описание прыжковой проводимости по ближайшим соседям.
27. Очень низкие температуры: качественное описание проводимости с переменной длиной прыжка.
28. Прыжки электронов между примесями, сопровождаемые поглощением или излучением фононов. Сетка сопротивлений Миллера-Абрахамса.
29. Применение теории перколяции. Зависимость проводимости от температуры и концентрации примесей в режиме проводимости по ближайшим соседям.
30. Проводимость с переменной длиной прыжка, закон Мотта.
31. Качественный вывод (для различных размерностей d). Эффективная $d+1$ -мерная перколяционная модель и количественный вывод закона Мотта.
32. Туннелирование в магнитном поле. Квазиклассический характер волновых функций и деформация “поверхностей постоянного действия” магнитным полем.
33. Модификация сетки Миллера-Абрахамса в магнитном поле и вычисление магнитосопротивления с помощью теории перколяции. Пределы слабого и сильного полей. Анизотропия магнитосопротивления.
34. Магнитосопротивление в режиме проводимости с переменной длиной прыжка.
35. Эффекты электрон-электронного взаимодействия: пошаговая процедура минимизации классической электростатической энергии.
36. Первое приближение: фермиевское заполнение одночастичных состояний.
37. Второе приближение: парные корреляции. Кулоновская щель в плотности состояний. Роль высших приближений.
38. Различные сценарии многочастичных эффектов в проводимости.
39. Закон Эфроса-Шкловского для проводимости с переменной длиной прыжка.
40. Влияние подбарьерного рассеяния на декремент локализованной волновой функции.

41. Подавление положительного магнитосопротивления подбарьерным рассеянием.
42. Интерференционные явления: эффект Ааронова-Бома, отрицательное магнитосопротивление.
43. Андерсоновская локализация в модели Андерсона. Край подвижности. Локализованные и делокализованные состояния: чем они отличаются друг от друга?
44. Структура волновых функций вблизи порога подвижности. Длина локализации. Мультифрактальность.
45. Пределы применимости классической теории проводимости металлов. Квантовая интерференция актов рассеяния (качественное рассмотрение). Самопересекающиеся пути и их вклад в интерференционные члены.
46. Диффузионный пропагатор и его физическая интерпретация.
47. Последовательность диаграмм, отвечающая первой квантовой поправке: Куперон и его физическая интерпретация. Расходимость квантовой поправки к проводимости в пространстве низкой размерности. Процессы сбоя фазы и инфракрасное обрезание.
48. Граничные условия для Куперона и размерные эффекты. Размерный кроссовер.
49. Отрицательное магнитосопротивление: вывод и физическая интерпретация. Осцилляции магнитосопротивления тонкого металлического цилиндра в диффузионном режиме (эксперимент Шарвина и Шарвина).
50. Квантовые поправки к кондактансу диффузионного S-N-S контакта.
51. Роль андреевского отражения.
52. Неупругие процессы и их роль в сбое фазы. Время сбоя фазы за счет квазиупругих процессов.
53. Электрон-электронные столкновения: баллистический и диффузионный режимы. Применимость теории Ферми-жидкости к грязным металлам.
54. Влияние электрон-электронных столкновений на плотность состояний. Аномалия на поверхности Ферми (zero bias anomaly).
55. Мезоскопический масштаб. Отсутствие самоусреднения.
56. Когерентный транспорт: Формула Ландауера для проводимости в двухконтактной конфигурации. Роль неупругих процессов.
57. Четырехконтактная конфигурация.
58. Баллистический кондактанс адиабатического сужения. Квантование кондактанса.
59. Когерентный транспорт: последовательное соединение кондактансов.
60. Неаддитивность сопротивления и одномерная локализация.

61. Параллельное соединение кондактансов.

Примеры экзаменационных билетов

Билет 1.

1. Динамический и замороженный беспорядок: усреднение по времени и усреднение по ансамблю.
2. Проводимость с переменной длиной прыжка, закон Мотта.
3. Одномерный электрон с гамильтонианом

$$\hat{H} = -\frac{d^2}{dx^2} + U(x)$$

находится в случайном потенциале, создаваемом одинаковыми короткодействующими отталкивающими центрами, расположенными в случайно выбранных точках x_i :

$$U(x) = \kappa \sum_i \delta(x - x_i), \quad \kappa > 0.$$

Точки x_i распределены по Пуассону со средней плотностью n . Плотность считайте малой: $n = \kappa$.

• Исследуйте спектр электрона E_λ и его волновые функции $\psi_\lambda(x)$ в области энергий $0 < E = \kappa^2$. В частности, определите значения $\psi_\lambda(x_i)$ в точках, где расположены рассеиватели.

• Найдите среднюю плотность состояний при энергиях $0 < E = \kappa^2$ и исследуйте ее асимптотики при $0 < E = n^2$ и при $n^2 = E = \kappa^2$.

Билет 2.

1. Кристаллы, жидкости, стекла, сплавы, магнитные системы. Дальний и ближний порядок.
2. Неупругие процессы и их роль в сбое фазы. Время сбоя фазы за счет квазиупругих процессов.
3. Рассмотрим двумерную прыжковую проводимость в режиме NNN (прыжки по ближайшим соседям). Пусть к системе подведены два контакта в точках a и b на расстоянии L_{ab} ? $L_{corr}^{(net)}$ друг от друга. Контакты имеют вид идеально проводящих дисков радиуса $r = L_{ab}$. Интуитивно ясно, что величина сопротивления R_{ab} между этими контактами может зависеть от конкретного расположения примесей и флуктуировать от образца к образцу, отклоняясь от значения $R_{ab}^{(hom)}$, которое получается, если рассматривать систему, как непрерывную среду. Исследуйте флуктуации величины R_{ab} при $L_{corr}^{(net)} = r = L_{ab}$. Найдите функцию распределения $F_r(\Delta R)$ величины $\Delta R = R_{ab} - R_{ab}^{(hom)}$. Покажите, что распределение в этом случае гауссово, а флуктуации относительно малы. Найдите их дисперсию.