

**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:	Семинар по физике твердого тела
по направлению:	Электроника и нанoeлектроника
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики твердого тела
курс:	2
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.Ф. Шевчун, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики твердого тела 09.06.2021

Аннотация

Предлагаемый семинар ориентирован на студентов-экспериментаторов и является дополнительным при изучении дисциплин физики твердого тела. Семинар позволит собрать ранее полученные знания вместе и выявить и восполнить возможные пробелы в понимании эффектов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Предлагаемый семинар ориентирован на студентов-экспериментаторов и является дополнительным при изучении дисциплин физики твердого тела. Изложение ограничено сравнительно простой математикой и требует знания изученных ранее на кафедре дисциплин в рамках стандартного курса.

Задачи дисциплины

Напомнить студентам основные понятия и идеи в области физики твердого тела, с постановкой задач и подходами к их решениям. Семинар позволит собрать ранее полученные знания вместе и выявить и восполнить возможные пробелы в понимании эффектов. Кроме того, предполагается, что прослушав этот курс, студенты смогут читать и понимать текущую научную периодику.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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-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-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
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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- что такое разрешенные и запрещенные зоны энергии;
- что такое квазиимпульс, поверхность Ферми, эффективная масса;
- что такое квазичастица, и, в частности, электрон и дырка;
- знать вид поверхности Ферми для типичных металлов;
- знать зонную структуру типичных полупроводников

уметь:

рассчитать зонную структуру в простейших приближениях (слабой и сильной связи);
выводить температурную зависимость концентрации носителей в полупроводниках;
записать гамильтониан для электрона в приближении эффективной массы;
решать задачи по теме курса.

владеть:

методами решения уравнения Шредингера в простейших случаях;
методами расчета зонной структуры для модельных задач.

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	Понятие о конденсированных средах. Симметрия кристаллов		5		10
2	Синтез Фурье как метод анализа атомной структуры кристаллов. Разложение электронной плотности в трехмерный ряд Фурье. Этапы анализа неизвестной структуры. Последовательность применения различных схем съемки при определении сингонии, решетки Браве, точечной и пространственной групп, числа атомов в элементарной ячейке		5		10
3	Методы сильной связи. Зонная структура классических полупроводников. Энергетические спектры металлов и поверхность Ферми		5		10
4	Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Распределение Ферми-Дирака, эффективная плотность состояний в зонах. Уровень Ферми в собственном полупроводнике и в легированных полупроводниках		5		10
5	Переход металл-изолятор в сценарии Андерсона. Интерференционная квантовая поправка (слабая локализация). Переход металл-изолятор в сценарии Андерсона		5		10

6	Термодинамика сверхпроводников. Функционал Гинзбурга-Ландау. Теории Гинзбурга-Ландау и основные задачи. Сверхпроводники 1 и 2 рода. Вихри Абрикосова. Физика вихревого состояния сверхпроводников 2 рода		5		10
Итого часов			30		60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 3 (Осенний)

1. Понятие о конденсированных средах. Симметрия кристаллов

Типы конденсированных сред. Кристаллы, жидкости, аморфное состояние, жидкие кристаллы, пластические (ротационные) кристаллы. Типы межатомных и межмолекулярных связей

Трансляционная симметрия кристаллов. Кристаллическая решётка, решетки Браве. Пространственные группы симметрии. Классификация кристаллических систем (сингонии).

2. Синтез Фурье как метод анализа атомной структуры кристаллов. Разложение электронной плотности в трехмерный ряд Фурье. Этапы анализа неизвестной структуры. Последовательность применения различных схем съемки при определении сингонии, решетки Браве, точечной и пространственной групп, числа атомов в элементарной ячейки

Синтез Фурье, как метод анализа атомной структуры кристаллов. Разложение электронной плотности в трехмерный ряд Фурье, структурные амплитуды как коэффициенты ряда. Обратная решетка, веса узлов, геометрический образ разложения Фурье. Этапы анализа неизвестной структуры. Последовательность применения различных схем съемки при определении сингонии, решетки Браве, точечной и пространственной групп, числа атомов в элементарной ячейки. Экспериментальные и расчетные методы определения координат атомов в ячейке. Метод проб и ошибок. Синтез Паттерсона. Синтез Фурье. Задачи анализа металлических систем. Идентификация фазовых областей на диаграммах состояния. Упорядочение твердых растворов.

3. Методы сильной связи. Зонная структура классических полупроводников. Энергетические спектры металлов и поверхность Ферми

Метод сильной связи. Схемы расширенных, приведенных и повторяющихся зон. Зонная теория. Металлы, полупроводники, диэлектрики. Зонная структура классических полупроводников. Спектр вблизи экстремумов зон. Электроны и дырки в полупроводниках. Невырожденная зона и эффективная масса. Многодолинность. Вырожденность зон на примере зон легких и тяжелых дырок. Энергетические спектры металлов и поверхность Ферми. Построение поверхности Ферми методом Гаррисона на примере простой квадратной решетки для двумерного случая. Общие сведения о влиянии на спектр электрон-электронного взаимодействия (теория ферми-жидкости) и фононов (поляронный эффект).

4. Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Распределение Ферми-Дирака, эффективная плотность состояний в зонах. Уровень Ферми в собственном полупроводнике и в легированных полупроводниках

Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Распределение квантовых состояний в зонах, распределение Ферми-Дирака, эффективная плотность состояний в зонах, концентрация носителей в вырожденных и невырожденных полупроводниках, концентрация электронов и дырок на локальных уровнях. Уровень Ферми в собственном полупроводнике и в легированных полупроводниках. Явления в контактах, контактная разность потенциалов.

5. Переход металл-изолятор в сценарии Андерсона. Интерференционная квантовая поправка (слабая локализация). Переход металл-изолятор в сценарии Андерсона

Понятие о фазовом переходе Андерсона в разупорядоченной электронной системе. Расплывание волнового пакета на разных масштабах времен, длина локализации и ее поведение вблизи порога подвижности. Непрерывный фазовый переход. Многократное когерентное рассеяние, эффект когерентного рассеяния назад для света, классические эксперименты Вольфа Маррета и др. Квазиклассический подход к многократному рассеянию в электронной системе. Роль самопересекающихся траекторий, аргумент Ларкина-Хмельницкого. Длина сбоя фазы. Эксперименты Шарвина-Шарвина. Слабая антилокализация, связь со спином и статистикой фермионов.

6. Термодинамика сверхпроводников. Функционал Гинзбурга-Ландау. Теории Гинзбурга-Ландау и основные задачи. Сверхпроводники 1 и 2 рода. Вихри Абрикосова. Физика вихревого состояния сверхпроводников 2 рода

Термодинамика сверхпроводников. Фазовая диаграмма сверхпроводящего состояния. Термодинамические потенциалы в окрестности сверхпроводящего перехода. Переходы 1 и 2 рода. Сверхпроводящая волновая функция и функционал Гинзбурга-Ландау. Вывод уравнений Гинзбурга-Ландау. Граничные условия и градиентная инвариантность. Эффект близости на границе с нормальным металлом. Критическое поле и ток тонкой пленки. Энергия границы раздела нормального и сверхпроводящего состояния. Сверхпроводники 1 и 2 рода. Уравнение и структура вихря Абрикосова. Взаимодействие вихрей Абрикосова. Необратимый магнитный момент сверхпроводника 2 рода в смешанном состоянии. Пиннинг. Крип и режим течения потока.

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

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Физика твердого тела [Текст] : в 2 т. Т. 1 / Н. Ашкрофт, Н. Мермин ; пер. с англ. А. С. Михайлова ; под ред. М. И. Каганова .— М. : Мир, 1979 .— 399 с.
2. Физика твердого тела [Текст] : в 2 т. Т. 2 : [учеб. пособие для вузов] / Н. Ашкрофт, Н. Мермин ; пер. с англ. К. И. Кугеля, А. С. Михайлова ; под ред. М. И. Каганова .— М. : Мир, 1979 .— 424 с.
3. Введение в теорию полупроводников [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. И. Ансельм .— 2-е изд., доп. и перераб. — М. : Наука, 1978 .— 615 с.

Дополнительная литература

1. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках [Текст]/В. Ф. Гантмахер, И. Б. Левинсон, -М., Наука, 1984

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

<http://issp3.issp.ac.ru/kafedra/>

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

Презентация в формате PPT или PDF.

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, 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 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 к преподавателю.

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

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Электроника и нанoeлектроника
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики твердого тела
курс:	2
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Зачет	
Разработчик:	А.Ф. Шевчун, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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-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-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
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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Семинар по физике твердого тела» обучающийся должен:

знать:

- что такое разрешенные и запрещенные зоны энергии;
- что такое квазиимпульс, поверхность Ферми, эффективная масса;
- что такое квазичастица, и, в частности, электрон и дырка;
- знать вид поверхности Ферми для типичных металлов;
- знать зонную структуру типичных полупроводников

уметь:

рассчитать зонную структуру в простейших приближениях (слабой и сильной связи);
выводить температурную зависимость концентрации носителей в полупроводниках;
записать гамильтониан для электрона в приближении эффективной массы;
решать задачи по теме курса.

владеть:

методами решения уравнения Шредингера в простейших случаях;
методами расчета зонной структуры для модельных задач.

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

Перечень контрольных вопросов:

1. Перечислите основные типы конденсированных сред, указав их отличия.
2. Какие порядки осей симметрии могут реализовываться в кристаллах?
3. Что такое дырка в полупроводнике?
4. Электронная зона германия.
5. Расстояние между уровнями Ландау.

Примеры контрольных заданий:

1. Вычислить циклотронную массу электронов, используя формулу, связывающую циклотронную массу и площадь сечения изоэнергетической поверхности.
2. Найти зависимость давления от концентрации электронного газа, подчиняющегося статистике Ферми-Дирака при нулевой температуре.
3. В одномерном случае установить связь импульса Ферми p_F и концентрации свободных электронов n .
4. Определить энергетический спектр электронов в приближении сильной связи для простой квадратной решетки.
5. Найти связь компонент циклотронной и эффективной масс в случае квадратичного анизотропного закона дисперсии $\epsilon = p_x^2/2m_x + p_y^2/2m_y + p_z^2/2m_z$.

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

Зачет проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено теоретический вопрос и задача. При проведении зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.