

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Электронные свойства твердых тел
по направлению:	Электроника и нанoeлектроника
профиль подготовки:	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра твердотельной электроники, радиофизики и прикладных информационных технологий
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.А. Холоднов, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры твердотельной электроники, радиофизики и прикладных информационных технологий 29.05.2020

Аннотация

Курс "Электронные свойства твердых тел" предназначен дать углубленные специализированные знания, необходимые для выполнения научных исследований в рамках дипломных проектов бакалавров и магистров, направленных на изучение новых физических эффектов в твердом теле, применимых для создания новых электронных устройств. При этом основной акцент делается на физику полупроводников и некоторые методы теоретического описания наиболее значимых явлений в твердом теле.

Задачи дисциплины:

- Ознакомление студентов с физическими основами явления сверхпроводимости и сверхпроводниковой электроники;
- Дать студентам знания в области наиболее важных практических приложений в науке, технике и технологиях;
- Привить студентам навыки к развитию новых подходов к постановке и решению задач фундаментального и прикладного значения.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

Природу явлений проводимости в твердом теле и его электронных свойств, а также основные методы теоретического описания основополагающих электрофизических свойств твердых тел.

Уметь:

Самостоятельно ставить и решать задачи по теоретическому исследованию особенностей

Ставить и решать задачи по теоретическому исследованию особенностей электронных явлений в твердых телах.

Владеть:

Навыками и методами теоретического исследования основных параметров электронных свойств твердых тел.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Систематика электронных состояний в кристаллах.
2. Электронная зонная структура.
3. Приближение эффективной массы в полупроводниках.
4. Статистическое распределение электронов и дырок в полупроводниках.
5. Кинетическое уравнение Больцмана.
6. Статические кинетические свойства металлов и полупроводников.
7. Диэлектрическая проницаемость твердого тела.
8. Кинетические явления в магнитном поле.
9. Разогрев электронного газа в электрическом поле.
10. Основные эффекты в полупроводниках в сверхсильных электрических полях.
11. Контактные явления. Неоднородные электронные системы.
12. Сверхпроводимость.
13. Рекомбинация неравновесных носителей в полупроводниках.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- дать углубленные специализированные знания, необходимые для выполнения научных исследований в рамках дипломных проектов бакалавров и магистров, направленных на изучение новых физических эффектов в твердом теле, применимых для создания новых электронных устройств. При этом основной акцент делается на физику полупроводников и некоторые методы теоретического описания наиболее значимых явлений в твердом теле.

Задачи дисциплины

- ознакомление студентов с физическими основами явления сверхпроводимости и сверхпроводниковой электроники;
- дать студентам знания в области наиболее важных практических приложений в науке, технике и технологиях;
- привить студентам навыки к развитию новых подходов к постановке и решению задач фундаментального и прикладного значения.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- природу явлений проводимости в твердом теле и его электронных свойств, а также основные методы теоретического описания основополагающих электрофизических свойств твердых тел.

уметь:

- самостоятельно ставить и решать задачи по теоретическому исследованию особенностей;
- ставить и решать задачи по теоретическому исследованию особенностей электронных явлений в твердых телах.

владеть:

- навыками и методами теоретического исследования основных параметров электронных свойств твердых тел.

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	Систематика электронных состояний в кристаллах.	2			2
2	Электронная зонная структура.	2			2
3	Приближение эффективной массы в полупроводниках.	2			2
4	Статистическое распределение электронов и дырок в полупроводниках.	2			2
5	Кинетическое уравнение Больцмана.	2			2

6	Статические кинетические свойства металлов и полупроводников.	2			2
7	Диэлектрическая проницаемость твердого тела.	2			2
8	Кинетические явления в магнитном поле.	2			2
9	Разогрев электронного газа в электрическом поле.	4			2
10	Основные эффекты в полупроводниках в сверхсильных электрических полях.	4			3
11	Контактные явления. Неоднородные электронные системы.	2			3
12	Сверхпроводимость.	2			3
13	Рекомбинация неравновесных носителей в полупроводниках.	2			3
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 7 (Осенний)

1. Систематика электронных состояний в кристаллах.

Квазичастицы. Адиабатическое приближение. Кулоновское взаимодействие и приближение самосогласованного поля. Волновые функции электронов в периодическом потенциале, теорема Блоха. Квазиимпульс, обратная решетка, зона Бриллюэна.

2. Электронная зонная структура.

Приближение почти свободных электронов. Приближение сильно связанных электронов. Функции Ваннье. Электронный спектр металлов, полупроводников, диэлектриков. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Плотность состояний. Динамика блоховского электрона. Эффективная масса и кр-приближение.

3. Приближение эффективной массы в полупроводниках.

Уравнение Шредингера для электронов в методе эффективной массы. Электронная структура примесных атомов. Экситоны Ваннье-Мотта. Уравнение движения электрона в кристалле. Дырки.

4. Статистическое распределение электронов и дырок в полупроводниках.

Металлы: вырожденный электронный газ. Полупроводники: невырожденный электронный газ. Собственные и примесные полупроводники. Компенсированные полупроводники. Температурная зависимость концентрации электронов и дырок и уровня Ферми в полупроводниках. Зависимость концентрации электронов и дырок от концентрации глубокой примеси.

5. Кинетическое уравнение Больцмана.

Кинетическое уравнение Больцмана. Условия применимости. Интеграл столкновений. Взаимодействие носителей заряда с точечными дефектами, фононами и между собой. Время упругого рассеяния и длина свободного пробега, тау-приближение.

6. Статические кинетические свойства металлов и полупроводников.

Электропроводность электронного газа в металлах и полупроводниках. Формула Друде для электропроводности. Вклад электронного газа в термоэлектрические эффекты и теплопроводность.

7. Диэлектрическая проницаемость твердого тела.

Диэлектрическая проницаемость твердого тела. Вычисление линейного отклика по теории возмущений. Пространственная и временная дисперсия. Формула Линдхарда для диэлектрической проницаемости. Предельные случаи: экранирование статического поля, плазменные колебания. Коновская аномалия, фриделевские осцилляции.

8. Кинетические явления в магнитном поле.

Эффект Холла и продольное магнетосопротивление. Классически слабые и сильные магнитные поля.

9. Разогрев электронного газа в электрическом поле.

Время рассеяния энергии, длина энергетической релаксации. Горячие электроны, электронная температура.

10. Основные эффекты в полупроводниках в сверхсильных электрических полях.

Основные эффекты в полупроводниках в сверхсильных электрических полях.

Лавинное размножение носителей и его основные характеристики. Межзонное туннелирование.

11. Контактные явления. Неоднородные электронные системы.

Условия равновесия контактирующих проводников. Электронное сродство, работа выхода и контактная разность потенциалов. Распределение концентрации электронов и электрического поля вблизи контактов металл-полупроводник и полупроводник-полупроводник. Длина экранирования электрического поля. Вольтамперная характеристика p-n перехода и ее физическая интерпретация.

Размерное квантование и низкоразмерные электронные системы.

12. Сверхпроводимость.

Сверхпроводимость. Экранирование межэлектронного взаимодействия электронами и ионами и эффективное притяжение между электронами. Спектр элементарных возбуждений в сверхпроводнике. Незатухающий ток.

13. Рекомбинация неравновесных носителей в полупроводниках.

Рекомбинация неравновесных носителей в полупроводниках.

Межзонная излучательная рекомбинация, примесная рекомбинация (рекомбинация Холла-Шокли-Рида), межзонная Оже-рекомбинация. Зависимость скорости рекомбинации Холла-Шокли-Рида от концентрации рекомбинационных центров при слабом отклонении полупроводника от равновесного состояния.

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

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. - М.: Наука, 1978.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. - М.: Наука, 1990.
3. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. В 2 томах. - Мир, 1979
4. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. - М.: Мир, 1971.

Дополнительная литература

1. Каллуэй Дж. Теория энергетической зонной структуры. - М.: Мир, 1969.
2. Джонс Г. Теория зон Бриллюэна и электронные состояния в кристаллах. - М.: Мир, 1968.

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

Не используются

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

на лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, прослушавший курс лекций, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех лекций, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Электроника и нанoeлектроника
профиль подготовки:	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра твердотельной электроники, радиофизики и прикладных информационных технологий
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	В.А. Холоднов, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Электронные свойства твердых тел» обучающийся должен:

знать:

- природу явлений проводимости в твердом теле и его электронных свойств, а также основные методы теоретического описания основополагающих электрофизических свойств твердых тел.

уметь:

- самостоятельно ставить и решать задачи по теоретическому исследованию особенностей;
- ставить и решать задачи по теоретическому исследованию особенностей электронных явлений в твердых телах.

владеть:

- навыками и методами теоретического исследования основных параметров электронных свойств твердых тел.

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

В целях текущего контроля успеваемости проводится краткий опрос по темам предыдущего занятия

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

Вопросы к экзамену:

- 1 Систематика электронных состояний в кристаллах.
- 2 Электронная зонная структура.
- 3 Приближение эффективной массы в полупроводниках.
- 4 Статистическое распределение электронов и дырок в полупроводниках.
- 5 Кинетическое уравнение Больцмана.
- 6 Статические кинетические свойства металлов и полупроводников.
- 7 Диэлектрическая проницаемость твердого тела.
- 8 Кинетические явления в магнитном поле.
- 9 Разогрев электронного газа в электрическом поле.
- 10 Основные эффекты в полупроводниках в сверхсильных электрических полях.
- 11 Контактные явления. Неоднородные электронные системы.
- 12 Сверхпроводимость.
- 13 Рекомбинация неравновесных носителей в полупроводниках.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Диэлектрическая проницаемость твердого тела.

2. Кинетические явления в магнитном поле.

Пример 2.

1. Электронная зонная структура.
2. Приближение эффективной массы в полупроводниках.

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;

- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;

- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

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

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.