

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 6 от 31.05.2023 г.

Рабочая программа дисциплины

Теория полупроводников

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
профиль "Физика конденсированного состояния "

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Теория полупроводников» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является обязательной для освоения, преподается на четвертом году обучения, в седьмом семестре. Освоению дисциплины предшествует освоение дисциплин (модулей) «Квантовая механика», «Физика конденсированного состояния».

Целями освоения дисциплины «Теория полупроводников» являются:

1. овладение основными положениями современной квантовой теории объемных полупроводников;
2. освоение студентами методов расчёта зонной структуры полупроводников, а также методов описания локализованных состояний в полупроводниках;
3. выработка у студентов практических навыков исследования реальных полупроводников аналитическими и численными методами.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1: Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	<i>Демонстрация способности использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин</i>	(ПК-1) Знать границы применимости одноэлектронной теории полупроводников; (ПК-1) Уметь применять в рамках профессиональной деятельности методы и подходы одноэлектронной теории полупроводников; (ПК-1) Владеть навыками использования на практике методов одноэлектронной теории полупроводников.	Индивидуальные собеседования, тест	Вопросы к экзамену

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	7
Часов по учебному плану	252

в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	82
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	64
- КСР	2
самостоятельная работа	170
Промежуточная аттестация	36 экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Теорема Блоха. Основные признаки полупроводников. Квантовое описание проблемы. Приближения. Свойства блоховских состояний. Модель почти свободных (слабо связанных) электронов. Образование энергетической щели.	26	2	8	–	10	16
2. Приближение огибающей. Функции Ваннье. Эквивалентный гамильтониан – уравнение для огибающей.	26	2	8	–	10	16
3. k-р метод. k-р метод в зоне проводимости. Вырожденная зона. k-р метод в валентной зоне.	26	2	8	–	10	16
4. Сведения из теории групп в приложении к теории полупроводников. Точечные группы симметрии. Фактор-группа. Группа волнового вектора. Приводимые и неприводимые представления групп. Неприводимые представления и базисные функции групп тетраэдра и куба.	26	2	8	–	10	16
5. Полупроводники со структурой алмаза. Элементарная ячейка; зона Бриллюэна; пространственная группа структуры алмаза; группа волнового вектора в точке Г; k-р гамильтонианы в зоне проводимости и в валентной зоне; энергетические зонные диаграммы; электронные орбитали – sp^3 гибридизация; структура энергетических зон вблизи потолка валентной зоны – легкие и тяжелые дырки.	26	2	8	–	10	16

6. Спин-орбитальное взаимодействие в полупроводниках. Гамильтониан спин-орбитального взаимодействия в валентной зоне кремния: латтинжеровский базис; формализм полного углового момента; гамильтониан Латтинжера 6×6; зоны легких, тяжелых и спин-отщепленных дырок; гамильтониан Латтинжера 4×4.	26	2	8	–	10	16
7. Полупроводники со структурой цинковой обманки. к-р гамильтониан 4×4 для узкозонных полупроводников; гамильтониан с учетом спин-орбитального взаимодействия; гамильтониан Кейна; энергетические ветви в модели Кейна.	26	2	8	–	10	16
8. Примесные состояния, экситоны. Водородоподобная модель в кремнии; коррекция центральной ячейки; долинно-орбитальное взаимодействие; короткодействующий потенциал в эквивалентном гамильтониане. Понятие о поверхностных (таммовских) и интерфейсных состояниях. Экситонные волновые функции и уровни энергии.	32	2	8	–	10	22
В т.ч. текущий контроль	2	2				–
Промежуточная аттестация – экзамен						

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних контрольных работ с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Экзамен

Превосходно	Превосходная подготовка с очень незначительными погрешностями. Исчерпывающее и логически строгое изложение всех разделов дисциплины. Владение материалом позволяет быстро справиться с видоизмененным заданием. Успешное решение любых типов практических заданий.
Отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с некоторыми ошибками. Твердое знание всех разделов дисциплины. Допускаются неточности, нарушения в последовательности изложения материала. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Очень хорошо	Хорошая подготовка с рядом заметных недочетов. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения основных типов практических заданий.
Хорошо	В целом, хорошая подготовка, но со значительными ошибками. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям. Знания основного содержания разделов дисциплины, допускаются грубые неточности, неправильные формулировки, нарушения в последовательности изложения материала. Имеющихся знаний достаточно для освоения дисциплин последующих курсов. Допускаются значительные ошибки при выполнении практических заданий.
Неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. Незнание значительной части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.
Плохо	Подготовка совершенно недостаточная. Отсутствуют знания большей части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний совершенно недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

– индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

– выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Критерии ответа студента на экзамене

Оценка «отлично» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный и полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «хорошо» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности при этом допущены две–три несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя и правильно; полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «удовлетворительно» – Ответ полный, но при этом допущена существенная ошибка или неполный, несвязный ответ и выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «неудовлетворительно» – Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя, не выполнены индивидуальные практические задания

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1 Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

Вопрос 1. Характерные значения ширины запрещенной зоны в полупроводнике

Ответ:

- а) порядка 1 МэВ;
 - б) порядка 1 эВ;
 - в) запрещенная зона в полупроводниках не образуется;
 - г) запрещенная зона одинакова для всех полупроводников и равна 12.34 эВ.
- Правильный ответ – б).

Вопрос 2. Какого типа электронный спектр в полупроводнике?

Ответ:

- а) дискретные уровни;
 - б) полностью непрерывный;
 - в) зонный – чередующиеся разрешенные и запрещенные зоны;
 - г) смешанный – дискретный при отрицательных энергиях и непрерывный при положительных.
- Правильный ответ – в).

Вопрос 3. Каким из нижеперечисленных свойств симметрии обладает гамильтониан электрона в идеальном кристалле?

Ответ:

- а) сферическая симметрия (изотропия);
 - б) симметрия полностью отсутствует;
 - в) трансляционная инвариантность;
 - г) осевая симметрия (ось бесконечного порядка).
- Правильный ответ – в).

Вопрос 4. В каких пределах изменяется квазиимпульс блоховского электрона?

Ответ:

- а) в пределах зоны Бриллюэна;
 - б) квазиимпульс блоховского электрона всегда равен нулю;
 - в) в бесконечных пределах;
 - г) в области положительных значений каждой из трех компонент.
- Правильный ответ – а).

Вопрос 5. Как заполняются зоны электронами в идеальном собственном полупроводнике при нуле температуры?

Ответ:

- а) валентная зона и зона проводимости полностью заполнены;
- б) валентная зона полностью свободна, зона проводимости – полностью заполнена;
- в) валентная зона и зона проводимости полностью свободны;
- г) валентная зона полностью заполнена, зона проводимости – полностью свободна.

Правильный ответ – г).

Задачи для оценки сформированности компетенции ПК-1 (приведены ответы к задачам в тестовой форме)

Вопрос 1. Какой симметрией обладает закон дисперсии в кристалле (без учета спин-орбитального взаимодействия)?

Ответ:

- а) $\varepsilon(-\mathbf{k}) = -\varepsilon(\mathbf{k})$;
- б) $\varepsilon(-\mathbf{k}) = \varepsilon(\mathbf{k})$;
- в) симметрия закона дисперсии полностью отсутствует;
- г) $\varepsilon(2\mathbf{k}) = \varepsilon(\mathbf{k})$.

Правильный ответ – б).

Вопрос 2. В каком случае энергетическая зона в полупроводнике называется невырожденной?

Ответ:

- а) одному значению квазиимпульса в зоне соответствует одно блоховское состояние;
- б) одному значению квазиимпульса в зоне соответствуют несколько блоховских состояний;
- в) разным значениям квазиимпульса в зоне соответствует одно блоховское состояние;
- г) нет состояний, соответствующих каким-либо значениям квазиимпульса.

Правильный ответ – а).

Вопрос 3. Где расположены уровни мелких доноров?

Ответ:

- а) в валентной зоне;
- б) в зоне проводимости;
- в) в запрещенной зоне, под дном зоны проводимости;
- г) в запрещенной зоне, над потолком валентной зоны.

Правильный ответ – в).

Вопрос 4. Что такое экситон?

Ответ:

- а) два электрона, сталкивающиеся друг с другом;
- б) связанное состояние электрона и дырки;
- в) электрон, находящийся во внешнем электрическом поле;
- г) электрон, находящийся во внешнем магнитном поле.

Правильный ответ – б).

Вопрос 5. Какой параметр характеризует крутизну закона дисперсии в окрестности минимума в энергетической зоне?

Ответ:

- а) диэлектрическая проницаемость полупроводника;
- б) магнитная проницаемость полупроводника;
- в) объем кристалла;
- г) эффективная масса.

Правильный ответ – г).

6.3.2. Вопросы для итогового контроля сформированности компетенции:

1. Откуда фотопроводимость у полупроводников?
2. Что означает вырождение зоны?
3. Что такое прямозонность?
4. sp^3 гибридизация – образование валентной зоны и зоны проводимости.
5. Латтинжеровский базис – для каких операторов эти функции являются собственными?

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Учебные аудитории могут быть при необходимости оснащены демонстрационным оборудованием для сопровождения учебных занятий презентациями.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Автор(ы):

зав. кафедрой теоретической физики физического факультета, д. ф.-м. н., доцент В.А. Бурдов.

Рецензенты(ы):

Заведующий кафедрой:

зав. кафедрой теоретической физики физического факультета, д. ф.-м. н., доцент В.А. Бурдов.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 20.05.2023, протокол № б/н.