

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Обнинский институт атомной энергетики –

филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(ИАТЭ НИЯУ МИФИ)**

ОТДЕЛЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

План одобрен Ученым советом

ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Протокол № 25.8 от 25.08.2025

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Физика полупроводников

Направление подготовки

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Образовательная программа

Плазменные и лазерные технологии материалов

Форма обучения: очная

г. Обнинск

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель изучения дисциплины:

овладение базовыми знаниями физики полупроводников, необходимыми для понимания электрических, оптических и магнитных свойств полупроводниковых материалов, а также для их применения в лазерных и плазменных технологиях материалов.

Задачи изучения дисциплины:

изучение зонной теории твёрдого тела и классификации материалов по типу проводимости;

освоение статистики носителей заряда в собственных и примесных полупроводниках;

изучение кинетических явлений в полупроводниках (электропроводность, эффект Холла, термоэлектрические явления);

изучение контактных явлений: p-n перехода, гетеропереходов и поверхностных эффектов;

освоение оптических и фотоэлектрических свойств полупроводников;

знакомство с полупроводниковыми материалами и технологиями их получения;

развитие навыков решения расчётных задач и анализа экспериментальных данных по физике полупроводников.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ (далее – ОП)

Дисциплина реализуется в рамках дисциплин по выбору и относится к профессиональному модулю.

Для освоения дисциплины необходимы компетенции, сформированные в рамках изучения следующих дисциплин: «Квантовая теория твёрдого тела», «Статистическая физика твёрдого тела», «Физика конденсированного состояния».

Дисциплины и/или практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее: «Лазерные и пучковые технологии материалов», подготовка выпускной квалификационной работы.

Дисциплина изучается на 4 курсе в 8 семестре.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

В результате освоения ОП обучающийся должен овладеть следующими результатами обучения по дисциплине:

Код компетенции	Наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ПК-1	Способен использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа,	3-ПК-1 Знать методы исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств полупроводниковых материалов, физические и химические процессы,

	<p>диагностики и моделирования свойств материалов, физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации</p>	<p>протекающие в полупроводниках при их получении, обработке и модификации</p> <p>У-ПК-1 Уметь использовать знания о методах исследования и анализа свойств полупроводниковых материалов при решении расчётных и исследовательских задач</p> <p>В-ПК-1 Владеть навыками расчёта и моделирования параметров полупроводниковых материалов на основе экспериментальных данных</p>
ПК-2	<p>Способен использовать на практике современные представления о влиянии структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями</p>	<p>З-ПК-2 Знать современные представления о влиянии структуры полупроводников на их электрические, оптические и магнитные свойства, а также о взаимодействии полупроводников с окружающей средой, полями и излучениями</p> <p>У-ПК-2 Уметь использовать знания о структуре полупроводников для прогнозирования и анализа их физических свойств</p> <p>В-ПК-2 Владеть навыками практического использования структурно-зависимых свойств полупроводников при выборе материалов для конкретных применений</p>
ПК-3	<p>Способен работать на научно-исследовательском и технологическом оборудовании в соответствии с правилами техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и норм охраны труда</p>	<p>З-ПК-3 Знать правила техники безопасности, производственной санитарии и охраны труда при работе с оборудованием для исследования полупроводниковых материалов</p> <p>У-ПК-3 Уметь работать на оборудовании для измерения электрических и оптических свойств полупроводников с соблюдением требований техники безопасности</p> <p>В-ПК-3 Владеть навыками эксплуатации оборудования для исследования полупроводниковых материалов и соблюдения требований охраны труда</p>
УКЕ-1	<p>Способен использовать знания естественнонаучных дисциплин, применять</p>	<p>З-УКЕ-1 Знать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и</p>

	методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в поставленных задачах	моделирования, применяемые при изучении физики полупроводников У-УКЕ-1 Уметь использовать математические методы для расчёта характеристик полупроводников, решать типовые задачи по физике полупроводников В-УКЕ-1 Владеть методами математического анализа и моделирования процессов в полупроводниках, методами обработки экспериментальных данных
ПК-4	Способен использовать на производстве знания о традиционных и новых технологических процессах и операциях в области материаловедения	3-ПК-4 Знать традиционные и новые технологические процессы получения и обработки полупроводниковых материалов У-ПК-4 Уметь применять знания о технологических процессах получения полупроводников при выборе методов синтеза и обработки материалов В-ПК-4 Владеть навыками интеграции знаний о технологических процессах получения полупроводников в производственный цикл
ПК-6.1	Способен использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств материалов, физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации	3-ПК-6.1 Знать методы исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств полупроводниковых материалов, физические и химические процессы при их получении, обработке и модификации У-ПК-6.1 Уметь применять методы исследования и моделирования для анализа свойств полупроводниковых материалов В-ПК-6.1 Владеть навыками использования методов исследования и моделирования свойств полупроводниковых материалов в расчётах и экспериментальных исследованиях

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания	Воспитательный потенциал дисциплин
Интеллектуальное	формирование культуры	Использование воспитательного

воспитание	умственного труда	потенциала дисциплин естественнонаучного и профессионального модуля для формирования культуры умственного труда посредством вовлечения студентов в учебные исследовательские задания, решение расчётных задач по физике полупроводников, анализ экспериментальных данных.
Профессиональное и трудовое воспитание	формирование глубокого понимания социальной роли профессии, позитивной и активной установки на ценности избранной специальности, ответственного отношения к профессиональной деятельности, труду	Использование воспитательного потенциала дисциплины для формирования позитивного отношения к профессии материаловеда, понимания её социальной значимости и роли в обществе, стремления следовать нормам профессиональной этики посредством контекстного обучения, решения практико-ориентированных задач по выбору и применению полупроводниковых материалов, формирования навыков командной работы при выполнении совместных проектов.

5. ОБЪЁМ ДИСЦИПЛИНЫ В ЗАЧЁТНЫХ ЕДИНИЦАХ С УКАЗАНИЕМ КОЛИЧЕСТВА АКАДЕМИЧЕСКИХ ЧАСОВ, ВЫДЕЛЕННЫХ НА КОНТАКТНУЮ РАБОТУ ОБУЧАЮЩИХСЯ С ПРЕПОДАВАТЕЛЕМ (ПО ВИДАМ ЗАНЯТИЙ) И НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Вид работы	Количество часов на вид работы по семестрам:
Контактная работа обучающихся с преподавателем	
Аудиторные занятия (всего)	45
В том числе:	
лекции	27
практические занятия (из них в форме практической подготовки)	18
Промежуточная аттестация	
В том числе:	
зачёт	0
Самостоятельная работа обучающихся	27

Всего (часы):	72
Всего (зачетные единицы):	2

6. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ, СТРУКТУРИРОВАННОЕ ПО ТЕМАМ (РАЗДЕЛАМ) С УКАЗАНИЕМ ОТВЕДЁННОГО НА НИХ КОЛИЧЕСТВА АКАДЕМИЧЕСКИХ ЧАСОВ И ВИДОВ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ

6.1. Разделы дисциплины и трудоёмкость по видам учебных занятий (в академических часах)

Неделя	№ п/п	Наименование раздела/темы дисциплины	Лек	Пр	Лаб	СРО
1	1.	Элементы зонной теории твёрдого тела	3	2		3
2	2.	Собственные и примесные полупроводники	3	2		3
3	3.	Статистика носителей заряда в полупроводниках	3	2		3
4	4.	Электропроводность полупроводников	3	2		3
5	5.	Кинетические явления в полупроводниках	3	2		3
6	6.	Контактные явления. р-п переход	3	2		3
7	7.	Полупроводниковые гетероструктуры и поверхности	3	2		3
8	8.	Оптические свойства полупроводников	3	2		3
9	9.	Полупроводниковые материалы и технологии	3	2		3
		Итого за 8 семестр:	27	18		27
		Всего:	27	18		27

Прим.: Лек – лекции, Пр – практические занятия/семинары, Лаб – лабораторные занятия, СРО – самостоятельная работа обучающихся, ПП – практическая подготовка.

6.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

Лекционный курс

Неделя	№	Наименование раздела/темы дисциплины	Содержание
1	1.1.	Элементы зонной теории твёрдого тела	Энергетические зоны в кристаллах. Возникновение зон в приближении сильной и слабой связи. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Эффективная масса электрона. Понятие дырки. Закон дисперсии.

2	1.2.	Собственные и примесные полупроводники	Собственная проводимость. Донорные и акцепторные примеси. Полупроводники n- и p-типа. Энергия ионизации примесей. Водородоподобная модель примеси. Глубокие уровни. Компенсация примесей.
3	2.1.	Статистика носителей заряда в полупроводниках	Функция распределения Ферми–Дирака. Положение уровня Ферми в собственных и примесных полупроводниках. Концентрация электронов и дырок. Уравнение электронейтральности. Вырождение полупроводника.
4	3.1.	Электропроводность полупроводников	Подвижность носителей заряда. Механизмы рассеяния: на фононах, ионизованных примесях. Температурная зависимость подвижности и электропроводности. Собственная и примесная электропроводность.
5	3.2.	Кинетические явления в полупроводниках	Эффект Холла. Коэффициент Холла. Определение типа проводимости и концентрации носителей. Термоэлектрические явления (Зеебека, Пельтье, Томсона). Магнетосопротивление. Эффект Ганна.
6	4.1.	Контактные явления. p-n переход	Энергетическая диаграмма p-n перехода. Контактная разность потенциалов. Вольт-амперная характеристика. Прямое и обратное смещение. Барьерная и диффузионная ёмкость. Пробой p-n перехода.
7	4.2.	Полупроводниковые гетероструктуры и поверхности	Гетеропереходы. Электронные состояния на поверхности. Поверхностные уровни Тэмма и Шокли. ОПЗ. Эффект поля. Структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП).
8	5.1.	Оптические свойства полупроводников	Поглощение света: фундаментальное, экситонное, примесное, свободными носителями. Фотопроводимость.

			Люминесценция. Инжекционная и предпороговая люминесценция. Полупроводниковые лазеры.
9	6.1.	Полупроводниковые материалы и технологии	Классификация полупроводниковых материалов: элементные (Si, Ge), соединения (АІІІ BV, АІІВVI). Методы получения монокристаллов: Чохральского, зонной плавки. Эпитаксия. Легирование. Полупроводники в лазерных и плазменных технологиях.

Практические/семинарские занятия

Неделя	№	Наименование раздела/темы дисциплины	Содержание
1	1.1.	Элементы зонной теории твёрдого тела	Расчёт ширины запрещённой зоны. Определение эффективной массы носителей заряда. Построение зонных диаграмм.
2	1.2.	Собственные и примесные полупроводники	Расчёт энергии ионизации примесей по водородоподобной модели. Определение концентрации примесей. Расчёт температуры истощения примеси.
3	2.1.	Статистика носителей заряда	Расчёт концентрации электронов и дырок в собственных и примесных полупроводниках. Определение положения уровня Ферми при различных температурах.
4	3.1.	Электропроводность полупроводников	Расчёт подвижности и электропроводности. Температурные зависимости. Определение ширины запрещённой зоны по температурной зависимости электропроводности.
5	3.2.	Кинетические явления	Расчёт коэффициента Холла. Определение типа проводимости и концентрации носителей. Расчёт термоэлектрических коэффициентов.
6	4.1.	Контактные явления. р-п переход	Расчёт контактной разности потенциалов. Построение ВАХ р-п перехода. Расчёт барьерной и диффузионной ёмкости.
7	4.2.	Гетероструктуры и	Расчёт ширины ОПЗ. Построение

		поверхности	энергетических диаграмм гетеропереходов. Расчёт порогового напряжения МДП-структур.
8	5.1.	Оптические свойства	Расчёт коэффициента поглощения. Определение ширины запрещённой зоны по краю фундаментального поглощения. Расчёт фотопроводимости.
9	6.1.	Полупроводниковые материалы и технологии	Сравнительный анализ полупроводниковых материалов. Расчёт параметров для выбора материала в лазерных и плазменных технологиях.

7. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ

Освоение дисциплины «Физика полупроводников» предполагает следующие общие методические рекомендации для обучающихся:

при освоении теоретического материала необходимо опираться на конспекты лекций и рекомендованную основную литературу; для углублённого изучения отдельных тем следует обращаться к дополнительной литературе;

при подготовке к практическим занятиям необходимо предварительно ознакомиться с теоретическим материалом по соответствующей теме, изучить методы решения типовых задач;

самостоятельная работа обучающихся включает проработку лекционного материала, подготовку к практическим занятиям, выполнение индивидуальных расчётных заданий, подготовку к зачёту;

при выполнении расчётных задач необходимо использовать справочные данные по параметрам полупроводниковых материалов (ширина запрещённой зоны, эффективные массы, подвижности носителей заряда);

для проверки полученных знаний рекомендуется использовать контрольные вопросы и типовые задачи, приведённые в ФОС по дисциплине.

8. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Контроль успеваемости и оценка результатов освоения дисциплины осуществляются в соответствии с балльно-рейтинговой системой (БРС).

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения:

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Индикатор достижения компетенции	Наименование оценочного средства
1.	Элементы зонной теории. Собственные и примесные полупроводники. Статистика	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1 З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2 З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3	Коллоквиум

	носителей	3-УКЕ-1, У-УКЕ-1, В-УКЕ-1 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4 3-ПК-6.1, У-ПК-6.1, В-ПК-6.1	
2.	Электропроводность. Кинетические явления. Контактные явления. Оптические свойства. Материалы и технологии	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3 3-УКЕ-1, У-УКЕ-1, В-УКЕ-1 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4 3-ПК-6.1, У-ПК-6.1, В-ПК-6.1	Контрольная работа
	Промежуточная аттестация		
	Зачёт	Все индикаторы	Зачётный билет

Балльно-рейтинговая система оценивания:

Этап рейтинговой системы / Оценочное средство	Неделя	Балл (минимум)	Балл (максимум)
Текущая аттестация	1–9	36	60
Контрольная точка № 1	4–5	18	30
Коллоквиум	5	18	30
Контрольная точка № 2	8–9	18	30
Контрольная работа	9	18	30
Промежуточная аттестация		24	40
Зачётный билет		24	40
ИТОГО по дисциплине		60	100

Минимальное количество баллов за оценочное средство – это количество баллов, набранное обучающимся, при котором оценочное средство засчитывается. Минимальное количество баллов за текущую аттестацию и промежуточную аттестацию составляет 60% от соответствующих максимальных баллов.

Студент считается аттестованным по дисциплине, если он аттестован по каждому разделу, зачёту и его суммарный балл составляет не менее 60.

Бонусы: поощрительные баллы (не более 5) студент может получить за активную и регулярную работу на занятиях.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

9.1. Основная литература

1. Шастин С.Ф. Физика полупроводников: учебное пособие. – М.: ИИУ МГОУ, 2021. – 263 с.
2. Елифанов Г.И. Физика твёрдого тела: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2019. – 288 с.
3. Стритмен Б., Банерджи С. Физика полупроводниковых приборов: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2017. – 920 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: пер. с англ. – М.: Кн. дом Университет, 2013. – 455 с.

9.2. Дополнительная литература

5. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. – М.: Наука, 1978. – 792 с.
6. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела. – М.: Мир, 1979. – Т. 1–2.
7. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990. – 688 с.
8. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 2000. – 494 с.
9. Справочник по физике полупроводников / под ред. С.М. Сивухина. – М.: Наука, 2001.

10. ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

1. Электронно-библиотечная система IPR BOOKS – <http://www.iprbookshop.ru>
2. Электронно-библиотечная система «Лань» – <https://e.lanbook.com>
3. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU – <https://elibrary.ru>
4. Электронно-библиотечная система «Юрайт» – <https://urait.ru>
5. Semantic Scholar – <https://www.semanticscholar.org>

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВИДАМ РАБОТ

11.1. Методические указания по освоению лекционного материала

При работе с лекционным материалом необходимо вести конспект, выделять ключевые понятия и формулы. После каждой лекции рекомендуется проработать материал по учебнику, обращая особое внимание на выводы основных соотношений и физический смысл рассматриваемых величин.

11.2. Методические указания по подготовке к практическим занятиям

К каждому практическому занятию необходимо подготовиться: изучить теоретический материал по теме, разобрать методы решения типовых задач. При решении задач необходимо чётко формулировать используемые допущения, приводить размерности физических величин и анализировать полученные результаты на физическую достоверность.

11.3. Методические указания по организации самостоятельной работы

Самостоятельная работа включает: проработку лекционного материала (9 часов), подготовку к практическим занятиям (9 часов), подготовку к коллоквиуму и контрольной работе (6 часов), подготовку к зачёту (3 часа).

12. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

При изучении дисциплины используются следующие программные средства:

Microsoft Excel (или LibreOffice Calc) – для расчётов параметров полупроводников и построения графиков зависимостей;

Origin / Gnuplot – для обработки и визуализации экспериментальных данных;

Wolfram Mathematica – для аналитических вычислений при решении задач по зонной теории и статистике носителей заряда;

справочные базы данных по параметрам полупроводниковых материалов (Springer Materials, MatWeb).

13. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Для проведения лекционных и практических занятий используются:
учебные аудитории, оснащённые мультимедийным оборудованием (проектор, экран, ПК);
компьютерный класс с доступом к электронно-библиотечным системам и интернету;
демонстрационные стенды с образцами полупроводниковых материалов и полупроводниковых приборов.

14. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации дисциплины используются следующие образовательные технологии:
традиционная лекционно-семинарская форма обучения;
проблемно-ориентированный подход при решении расчётных задач;
контекстное обучение – использование примеров из области лазерных и плазменных технологий материалов;
самостоятельная работа с литературой и интернет-ресурсами.

Примерные задания для СРО:

1. Расчёт зонной диаграммы заданного полупроводникового материала и определение концентрации носителей заряда при заданной температуре.
2. Анализ температурной зависимости электропроводности примесного полупроводника и определение энергии ионизации примеси.
3. Расчёт ВАХ р-n перехода при заданных параметрах полупроводниковых областей.
4. Определение ширины запрещённой зоны по спектру поглощения полупроводника.
5. Сравнительный анализ полупроводниковых материалов для применения в лазерных технологиях.

Терминологический словарь:

Зона проводимости – верхняя незаполненная или частично заполненная энергетическая зона в полупроводнике, в которой электроны могут свободно перемещаться.

Валентная зона – верхняя полностью заполненная энергетическая зона при температуре 0 К.

Запрещённая зона – интервал энергий между потолком валентной зоны и дном зоны проводимости, в котором нет разрешённых энергетических уровней.

Эффективная масса – параметр, характеризующий динамику электрона (дырки) в кристалле под действием внешних сил.

Подвижность носителей заряда – дрейфовая скорость носителей в единичном электрическом поле.

Уровень Ферми – энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна 1/2.

р-n переход – контакт областей полупроводника с электронной и дырочной проводимостью.

Гетеропереход – переход между двумя полупроводниками с различной шириной запрещённой зоны.

ОПЗ – область пространственного заряда, возникающая вблизи поверхности или контакта полупроводника.

Экситон – связанное состояние электрона и дырки, удерживаемых кулоновским взаимодействием.