

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

2022 г.

« 13 » 04



Рабочая программа дисциплины

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика

Принята решением Ученого совета
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'S. Ivanov', is located at the bottom right of the page.

Рабочая программа дисциплины «Физика полупроводников» составлена на основании программы высшего образования – программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика (далее – программа аспирантуры)

1. Цель освоения дисциплины

Цель освоения дисциплины «Физика полупроводников» - дать аспирантам знания, касающиеся основных физических проблем в области физики полупроводников, необходимые для понимания протекающих в полупроводниках физических процессов, а также для понимания явлений, изучаемых в других курсах специальности, о новейших результатах исследований и их практическом применении.

2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры

Дисциплина «Физика полупроводников» входит в обязательную часть образовательного компонента программы аспирантуры и изучается для подготовки к сдаче кандидатского экзамена.

Содержание дисциплины служит основой для:

- подготовки к сдаче экзамена по специальности;
- написания кандидатской диссертации;
- осуществления дальнейшей профессиональной деятельности.

Курс изучается аспирантами на 3-ем году обучения в аспирантуре. Обучение ведется в форме аудиторных занятий (лекций) и самостоятельной подготовки.

В результате прохождения курса обучения по данной программе, аспирант должен освоить базовые принципы физики полупроводников и создания приборов на основе полупроводниковых структур в русле проблематики лаборатории (группы), где работает его научный руководитель и где предположительно будет проходить самостоятельная научная работа аспиранта. Изучение данной дисциплины и специфика подачи отдельных вопросов может варьироваться в зависимости от индивидуального плана работы аспиранта по согласованию с его научным руководителем в целях оптимального соответствия решаемым задачам.

3. Компетенции аспиранта, формируемые в результате освоения дисциплины «Физика полупроводников»

Процесс изучения дисциплины «Физика полупроводников» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с программой аспирантуры:

3.1. Универсальные компетенции:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений,

генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);

- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);

- готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках (УК-4);

- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5).

3.2. Общепрофессиональные компетенции:

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

- готовность к преподавательской деятельности по образовательным программам высшего образования (ОПК-2).

3.3. Профессиональные компетенции:

- способность планировать, организовывать работу по проектам, направленным на разработку новых физических принципов работы и создание приборов на базе полупроводниковых материалов и композиционных полупроводниковых структур, разработку методов исследования полупроводников и композитных полупроводниковых структур (ПК-1);

- способность осуществлять моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах, технологических процессов и полупроводниковых приборов (ПК-2);

- способность применять технологические методы получения полупроводниковых материалов, композитных структур, структур пониженной размерности и полупроводниковых приборов и интегральных устройств на их основе (ПК-3);

- способность получать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по теме исследования, выбирать и обосновывать методики и средства решения поставленных задач (ПК-4).

В результате освоения дисциплины аспирант должен демонстрировать и применять углубленные знания в профессиональной деятельности.

знать:

основные разделы научной дисциплины «Физика полупроводников»:

– химическая связь и атомная структура полупроводников;

- основы технологии полупроводников и методы определения их параметров;
- основы зонной теории полупроводников;
- равновесная статистка электронов и дырок в полупроводниках;
- кинетические явления в полупроводниках;
- рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках;
- контактные явления в полупроводниках;
- свойства поверхности полупроводников;
- оптические явления в полупроводниках;
- фотоэлектрические явления;
- основы физики некристаллических полупроводников;
- полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки;
- принципы действия полупроводниковых приборов.

уметь:

– самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами физики полупроводников;

– владеть математическим аппаратом и свободно пользоваться основными формулами, используемыми для оценок величин, характеризующих структуру и строение базовых полупроводниковых материалов; применять в своей работе знания электронно-дырочных, кинетических, электрических, фотоэлектрических, поверхностных и оптических явлений в полупроводниках;

– профессионально излагать результаты своих исследований и представлять их в виде научных публикаций, информационно-аналитических материалов и презентаций;

владеть:

знаниями по фундаментальным разделам физики полупроводников, необходимым для решения научно-исследовательских задач; научной терминологией, основными понятиями и концепциями физики полупроводников в пределах, необходимых для понимания специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами физики полупроводников.

4. Структура и содержание дисциплины «Физика полупроводников»:

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы (72 часа).

4.1. Объем дисциплины и количество учебных часов:

Вид учебной работы	Трудоемкость (в часах)
Лекции	38
Самостоятельная работа аспиранта	34
Итого	72
Вид итогового контроля	Кандидатский экзамен

4.2. Структура дисциплины

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в часах)			
		Лек	СЕМ	Лаб	СР
1	Химическая связь и атомная структура полупроводников	4			4
2	Основы зонной теории полупроводников	4			6
3.	Равновесная статистка электронов и дырок в полупроводниках	8			4
4	Кинетические явления в полупроводниках	4			4
5	Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках	4			4
6	Контактные явления в полупроводниках	4			4
7	Оптические явления в полупроводниках	4			4
8	Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки	6			4
9	Промежуточный зачет				
	ИТОГО	38			34

5. Содержание разделов (тем) дисциплины

5.1. Содержание аудиторных занятий

Тема 1. Химическая связь и атомная структура полупроводников

Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь. Структуры важнейших полупроводников - элементов A^{TM} , AVI и соединений типов A_nB_v , $AnBVI$, $AIVBVI$. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера—Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

Пространственная симметрия кристаллов (2 часа), примесные состояния в полупроводниках (2 часа).

Тема 2. Основы зонной теории полупроводников

(лекции - 4 часа)

Основные положения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Понятие эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс методом циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника.

Уровни энергии, создаваемые примесными центрами. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

(СР - 6 часов):

Энергетическая структура основных полупроводников, расчет энергии связи мелких и глубоких уровней в кристаллах (3 часа), влияние магнитного поля на движение носителей в полупроводниках (3 часа).

Тема 3. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

(лекции - 8 часов)

Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях.

Факторы вырождения примесных состояний. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

(СР - 4 часа)

Статистика электронов, фотонов и фононов в кристаллах; расчет положения уровня химического потенциала в компенсированном полупроводнике.

Тема 4. Кинетические явления в полупроводниках

(лекции - 4 часа)

Кинетические коэффициенты - проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость.

Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

(СР -4 часа)

Квантовый эффект Холла и эффект Шубникова –де Газа, слабая локализация в проводниках и полупроводниковых структурах, эффект Гана.

Тема 5. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках

(лекции - 4 часа)

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

(СР - 4 часа):

Прямые оптические переходы в полупроводниках, переходы с участием фононов и примесей.

Тема 6. Контактные явления в полупроводниках

(лекции - 4 часа)

Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки. Энергетическая диаграмма р-п перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в р-п переходе. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Варизонные полупроводники.

(СР - 4 часа):

Измерение характеристик полупроводникового транзистора и диода.

Тема 7. Оптические явления в полупроводниках

(лекции - 4 часа)

Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса — Кронига. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение. Поглощение света на свободных носителях заряда.

Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана - Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна -Мандельштама). Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.

Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Поккельса. Эффект Бурштейна-Мосса. Эффекты Фарадея и Фойгта.

(СР - 4 часа):

Оптическая ориентация спинов электронов и ядер в кристаллах.

Тема 8. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки

(лекции - 6 часа)

Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова - де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

(СР - 4 часа)

Измерение эффекта Шубникова-де Газа в объемном кристалле и в гетероструктуре с квантовой ямой.

5.2. Самостоятельная работа аспиранта

Самостоятельная работа аспиранта включает повторение лекционного материала по темам, чтение рекомендованной литературы и научной периодики, а также изучение методических рекомендаций к работе в лаборатории.

6. Оценочные средства для текущего контроля и промежуточной аттестации

Цель контроля - получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

6.1. Текущий контроль

Текущий контроль проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях, уровень подготовки.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений.

6.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация проводится в форме зачета с оценкой. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации и подготовки к экзаменам:

№	Наименование
1.	Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.
2.	Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых

	телах.
3.	Точечные дефекты, их образование и диффузия
4.	Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве.
5.	Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.
6.	Теорема Блоха.
7.	Понятие эффективной массы.
8.	Водородоподобные примесные центры
9.	Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ.
10.	Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках.
11.	Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.
12.	Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке.
13.	Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.
14.	Квазиравновесие, квазиуровни Ферми.
15.	Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.
16.	Длина диффузии неравновесных носителей заряда.
17.	Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта.
18.	Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
19.	Энергетическая диаграмма р-п перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в р-п переходе.
20.	Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса - Кронига.
21.	Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов.
22.	Экситонное поглощение и излучение.
23.	Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются.
24.	Квантовые нити. Квантовые точки.
25.	Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.
26.	Эффект Шубникова - де Гааза.

7. Образовательные технологии

В процессе обучения применяются следующие образовательные технологии:

1. Сопровождение лекций показом визуального материала;
2. Использование компьютерных моделей физических процессов в полупроводниках;
3. Выполнение лабораторных работ с использованием современного научного оборудования.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Учебные, учебно-методические и иные библиотечно-информационные ресурсы обеспечивают учебный процесс и гарантируют возможность качественного освоения аспирантом образовательной программы. ФТИ им. А.Ф.Иоффе располагает обширной библиотекой, включающей общенаучную и специальную литературу.

9. Литература

Основная литература:

Бонч-Бруевич В.Л., С.Г.Калашников «Физика полупроводников». М.:Наука, 1990.

1. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. «Физика низкоразмерных систем». СПб: Наука, 2001.

2. Воробьев Л.Е., Данило С.Н., Зегря Г.Г., Фирсов Д.А., Шальгин В.А., Ясиевич И.Н., Берегулин Е.В. «Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах». СПб :Наука, 2001.

3. П.Ю. М.Кардона «Введение в физику полупроводников».М.:Физматлит, 2002.

4. Розеншер Э., Винтер Б. «Оптоэлектроника». М.:Техносфера», 2004.

5. Ежов В.Б. Отечественные полупроводниковые приборы и зарубежные аналоги -М.: НТЦ "Микротех", 2005.

6. Мартинес-Дуарт, Мартин-Палма, Агулло-Руеда «Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники».М.: Техносфера, 2007.

7. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. СПб: Лань, 2008.

8. Г. Г. Зегря, В. И. Перель «Основы физики полупроводников».СПб: Физматлит, 2009.

9. Отечественные журналы:

- Физика Твердого Тела (бумажная версия)

- Физика и Техника Полупроводников (бумажная версия)

11. Иностраные журналы:

- Nature (бумажная версия)

- Phys. Rev. B (бумажная версия)

- Physics E: Solid State (бумажная версия)

Дополнительная литература

1. Р.Смит «Полупроводники». М.:Мир, 1982.

2. Кейси Х., Паниш М. «Лазеры на гетероструктурах», 2 тома. М.: Мир, 1981.

3. Херман М. «Полупроводниковые сверхрешетки». М.: Мир, 1989.

4. Воробьев Л.Е. «Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах». СПб: Наука, 2001.

5. Вингайкин Б.Е. «Физика твердого тела». М.: МГТУ, 2008.

6. Кумзеров Ю.А., Соловьёв В.Г., Ханин С.Д. «Физика регулярных матричных композитов и слоистых систем с наноструктурированными неорганическими и органическими веществами». Псков: ПГПУ, 2009.

7. Соболев Н.А. «Инженерия дефектов в технологии полупроводников. Физические основы в технологии кремниевых приборов». LAMBERT Academic PublishingБ 2011.

10. Программное обеспечение

1. Новые полупроводниковые материалы. Наноструктуры. Характеристики и свойства. База данных разработана и поддерживается сектором теоретических основ микроэлектроники: <http://www.matprop.ru/>.

2. Углеродные наноструктуры. Информационно-библиографическая база данных, поддерживаемая лабораторией физики кластерных структур: <http://www.Ioffe.ru/db-vul/>.

11. Интернет-ресурсы

Отечественные журналы:

1. Физика твердого тела, электронная версия; доступ с 1992 по текущий год.
2. Физика и техника полупроводников, электронная версия;
3. ЖЭТФ ; электронная версия;
3. Письма в ЖЭТФ электронная версия;
4. Успехи физических наук электронная версия;

Иностранные журналы:

1. Physical Review B (American Physical Society) электронная версия;
2. Physical Review Letters (American Physical Society) электронная версия;
4. Applied Physics A: Materials Science & Processing (Springer);
5. Central European Journal of Physics доступ с 2003 по текущий год;
6. The European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems (Springer);
7. International Journal of Modern Physics B (World Scientific Publishing Company) электронная версия;
8. Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
9. Journal of Physics : Condensed Matter (UK Institute of Physics) электронная версия;
10. Journal of Non-crystalline Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
11. Journal of Magnetism and Magnetic Materials (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
12. Nanotechnology (UK Institute of Physics) электронная версия;
13. Nature (Nature Publishing Group) электронная версия; доступ с 1997 по текущий год;
14. Nature Materials (Nature Publishing Group) электронная версия;
15. New Journal of Physics" (UK Institute of Physics) электронная версия;
16. Philosophical Magazine (Taylor & Francis Group) электронная версия;
17. Philosophical Magazine Letters (Taylor & Francis Group) электронная версия;
18. Physica B (Condensed Matter) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;

19. Physica C (Superconductivity)) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
20. Physica E (Nanostructures)) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
21. Physica Status Solidi A (Wiley)) электронная версия;
22. Physica Status Solidi B (Wiley) электронная версия;
23. Physica Status Solidi C (Wiley) электронная версия;
24. Physica Status Solidi RRL (Wiley) электронная версия;
25. Solid State Communications (Elsevier (Science Direct) электронная версия

12. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН располагает материально-технической базой, соответствующей санитарно-техническим нормам и обеспечивающей проведение всех видов теоретической и практической подготовки, предусмотренной учебным планом.

Наименование оборудования для проведения занятий по дисциплине:

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер
4. Установка нестационарной спектроскопии глубоких уровней для измерения концентрации, энергии активации и сечения захвата дефектов глубокими уровнями в полупроводниковых материалах.
5. Установка атомно-силовой микроскопии для исследования топографии поверхности эпитаксиальных полупроводниковых структур.
6. Установка локальной катодолюминесценции для исследования локальных оптических свойств полупроводниковых структур. Позволяет оценить эффективность излучательной рекомбинации, ширину запрещенной зоны материала и энергии оптических переходов через состояния в запрещенной зоне.
7. Установка рентгеноспектрального микроанализа на спектрометре с волной дисперсией позволяет проводить локальный анализ химического состава полупроводниковых структур.
8. Установка высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии для определения толщин, элементного состава и упругих напряжений в многослойных полупроводниковых гетероструктурах.

Программа разработана:

в.н.с. сектора теории квантовых когерентных явлений в твердом теле, д-р физ.-мат. наук, Глазов М.М.