

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

УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора Института по научной работе
С. В. Лебедев
2015 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Физика полупроводников
основной образовательной программы подготовки
научно-педагогических кадров в аспирантуре
по направлению 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки: 01.04.02 Теоретическая физика

Квалификация: Исследователь.
Преподаватель-исследователь

Принято Ученым советом
Протокол № 1 от 20 февраля 2015 г.

Санкт-Петербург
2015 г.

Шергина

Рабочая программа составлена на основании федеральных государственных образовательных стандартов основных образовательных программ высшего образования подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 03.06.01 Физика и астрономия, специальность 01.04.02 Теоретическая физика.

1. Цель освоения дисциплины

Курс предназначен для подготовки аспирантов к кандидатскому экзамену по специальности. Цель освоения дисциплины «Физика полупроводников» - дать аспирантам, обучающимся по профилю 01.04.02 «Теоретическая физика», 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 ООП

Дисциплина «Физика полупроводников» входит в обязательную часть учебного плана подготовки аспирантов по специальности 01.04.02.

Содержание дисциплины служит основой для:

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

Обучение ведется в форме аудиторных занятий 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. Требования к результатам освоения дисциплины

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

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).

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).

3.3. Профессиональные компетенции:

- способность планировать и организовывать работу по теоретическим проектам, направленным на изучение новых физических эффектов (ПК-1);
- способность получать и обрабатывать информацию по новым методам расчетов в области теоретической физики (ПК-2);
- способность анализировать и систематизировать научную информацию по современным достижениям в области общей физики и специальных областей физики по теме исследования (ПК-3);
- способность анализировать физические явления на качественном уровне, умение делать оценки и развивать навыки работы с экспериментальными данными (ПК-4).

4. Структура и содержание дисциплины «Физика конденсированного состояния»:
общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы (72 часа).

4.1. Объем дисциплины и количество учебных часов:

Вид учебной работы	Трудоемкость (в часах)
Аудиторные занятия	38
Лекции	36
Семинары	-
Лабораторные занятия	-
Другие виды учебной работы (промежуточный зачет)	2
Внеаудиторные занятия	34
Самостоятельная работа аспиранта	34
ИТОГО	72
Вид итогового контроля	зачет

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	4			4
9	Промежуточный зачет		2		
	ИТОГО	36	2		34

5. Содержание разделов (тем) дисциплины

5.1. Содержание аудиторных занятий

Тема 1 – Химическая связь и атомная структура полупроводников

(лекции - 4 часа)

Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь. Структуры важнейших полупроводников - элементов A^{IV} , AVI и соединений типов A_nB_m , A_nBVI , $AIVBVI$. 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.

(СР - 4 часа)

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. Многочарядные 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 Погкельса. 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 - 4 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. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации и подготовки к экзаменам:

N	Контрольные вопросы
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;

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:

1. Бонч-Бруевич В.Л., С.Г.Калашников «Физика полупроводников». М.: Наука, 1990
2. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. «Физика низкоразмерных систем». СПб: Наука, 2001
3. Воробьев Л.Е., Данило С.Н., Зегря Г.Г., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А., Ясиевич И.Н., Берегулин Е.В. «Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах». СПб: Наука, 2001
4. П.Ю. М.Кардона «Введение в физику полупроводников». М.: Физматлит, 2002
5. Розеншер Э., Винтер Б. «Оптоэлектроника». М.: Техносфера», 2004
6. Ежов В.Б. Отечественные полупроводниковые приборы и зарубежные аналоги -М.: НТЦ "Микротех", 2005
7. Мартинес-Дуарт, Мартин-Палма, Агулло-Руеда «Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники». М.: Техносфера, 2007
8. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. СПб: Лань, 2008
9. Г. Г. Зегря, В. И. Перель «Основы физики полупроводников». СПб: Физматлит, 2009
10. Отечественные журналы:
Физика Твёрдого 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. Винтайкин 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 Publishing 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; доступ с 1992 по текущий год
3. ЖЭТФ; электронная версия; доступ с 2001 по текущий год
4. Письма в ЖЭТФ электронная версия; доступ с 2008 по текущий год
5. Успехи физических наук электронная версия; доступ с 1988 по текущий год

Иностранные журналы:

1. Physical Review B (American Physical Society) электронная версия; доступ с 1970 по текущий год;
2. Physical Review Letters (American Physical Society) электронная версия; доступ с 1958 по текущий год;
3. Applied Physics A: Materials Science & Processing (Springer) подписка с 2013 года
4. Central European Journal of Physics доступ с 2003 по текущий год
5. The European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems (Springer) подписка с 2013 года
6. International Journal of Modern Physics B (World Scientific Publishing Company) электронная версия; доступ с 2003 по текущий год
7. Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 1958 по 2009
8. Journal of Physics : Condensed Matter (UK Institute of Physics) электронная версия; доступ с 1989 по текущий год
9. Journal of Non-crystalline Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 2003 по текущий год
10. Journal of Magnetism and Magnetic Materials (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 2003 по текущий год
11. Nanotechnology (UK Institute of Physics) электронная версия; доступ с 1990 по текущий год
12. Nature (Nature Publishing Group) электронная версия; доступ с 1997 по текущий год
13. Nature Materials (Nature Publishing Group) электронная версия; доступ с 2002 по текущий год
New Journal of Physics" (UK Institute of Physics) электронная версия; доступ с 1999 по текущий год
14. Philosophical Magazine (Taylor & Francis Group) электронная версия; доступ с 1798 по текущий год
15. Philosophical Magazine Letters (Taylor & Francis Group)) электронная версия; доступ с 1987 по текущий год
16. Physica B (Condensed Matter) (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 1999 по текущий год
17. Physica C (Superconductivity)) (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 1999 по текущий год
18. Physica E (Nanostructures)) (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 2003 по текущий год
19. Physica Status Solidi A (Wiley)) электронная версия; доступ с 1996 по текущий год
20. Physica Status Solidi B (Wiley) электронная версия; доступ с 1996 по текущий год

21. Physica Status Solidi C (Wiley) электронная версия; доступ с 2003 по текущий год
22. Physica Status Solidi RRL (Wiley) электронная версия; доступ с 2007 по текущий год
23. Solid State Communications (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 1972 по 2010

11. 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