



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

2.1.1.1 Физика полупроводников

Шифр и наименование группы научных специальностей

1.3. Физические науки

Шифр и наименование научной специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Форма обучения: очная

Институт: математики, естествознания и техники

Кафедра: физики, радиотехники и электроники

Трудоёмкость в ЗЕТ – 1

Трудоёмкость в часах – 36

Разработчик: к.ф.-м.н., доц. Кузнецов Д.В.

Общие положения

Рабочая программа дисциплины «Физика полупроводников» разработана в соответствии с федеральными государственными требованиями, утвержденными приказом Министерства образования и науки высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель дисциплины:

усвоение аспирантами знаний по физике полупроводников, об использовании полупроводниковых материалов в твердотельных устройствах нового поколения; изучение модельных представлений и основных теоретических принципов, описывающих свойства полупроводников при различных внешних воздействиях; формирование у аспирантов навыков экспериментального изучения физических параметров полупроводниковых систем.

Задачи изучения дисциплины:

- осознание социальной значимости своей будущей профессии, формирование мотивации к осуществлению профессиональной деятельности;
- подготовка к использованию систематизированных теоретических и практических знаний при решении профессиональных задач;
- изучение физики полупроводников;
- изучение принципов построения и работы электронных приборов различного назначения на основе полупроводниковых материалов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина относится к образовательному компоненту программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны:

знать:

- современные тенденции и проблематику научных исследований в области физики конденсированного состояния;
- методологические подходы к планированию и осуществлению научных исследований в области физики конденсированного состояния;
- основы оценки качества научных исследований в области физики конденсированного состояния.

уметь:

- планировать и осуществлять самостоятельную научно-исследовательскую

деятельность в области физики конденсированного состояния;

- составлять и оформлять программу научного исследования, отчетную документацию по итогам проведения научно-исследовательской деятельности;

- осуществлять внедрение результатов собственной научно-исследовательской деятельности в практику в области физики конденсированного состояния.

владеть:

- навыками планирования и выполнения самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области физики конденсированного состояния;

- методикой планирования и проведения опытно-экспериментальной работы в области физики конденсированного состояния;

- навыками оформления научной работы, ее презентации и защиты в области физики конденсированного состояния.

4. СТРУКТУРА, ОБЪЕМ И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Объем дисциплины и виды учебной работы

Трудоёмкость в ЗЕТ – 1

Трудоёмкость в часах – 36

Лекций – 18 ч.

Самостоятельная работа – 18 ч.

4.2. Разделы дисциплины и виды занятий

№	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, академ. часы			
		аудиторные занятия			
		Всего часов	Лекции	практические (лабораторные)	
1	Тема 1. Предмет, цели и задачи курса. Основная терминология. Химическая связь и атомная структура полупроводников.	4	2		2
2	Тема 2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).	4	2		2
3	Тема 3. Основы зонной теории полупроводников. Основные	4	2		2

	приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла.				
4	Тема 4. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний.	4	2		2
5	Тема 5. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.	4	2		2
6	Тема 6. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Уравнение кинетики рекомбинации.	4	2		2
7	Тема 7. Оптические явления в полупроводниках. Фотоэлектрические явления.	4	2		2
8	Тема 8. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки. Размерное квантование.	4	2		2
9	Тема 9. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.	4	2		2
	Промежуточная аттестация				
ИТОГО:		36	18		18

5. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

5.1. Текущий контроль по дисциплине осуществляется в форме контрольной работы

Типовой вариант к/р

1. Нарисовать зонную диаграмму собственного полупроводника, полупроводника n-типа, и полупроводника p-типа.
2. Концентрация электронов в начальный момент времени в полупроводнике составляет 10^{17} см^{-3} . За время 10^{-4} с эта концентрация уменьшилась до 10^{15} см^{-3} . Определить время жизни в таком полупроводнике.
3. Определить скорость дрейфа электронов и дырок в собственном германии при температуре $T = 300 \text{ K}$, если полупроводник находится в электрическом поле с напряженностью $E = 1000 \text{ В/см}$.
4. Определить и сравнить скорость дрейфа электронов в германии при напряженности поля $E = 10 \text{ см/кВ}$ с его скоростью придвижении на расстоянии 10 см в таком же поле в вакууме.
5. Определить ширину запрещенной зоны германия (Ge) при температуре $T = 500 \text{ K}$, если при $T = 300 \text{ K}$ ширина запрещенной зоны $0,658 \text{ эВ}$.
6. Определить ширину запрещенной зоны в германии (Ge) при $T = 300 \text{ K}$, если при $T = 0 \text{ K}$ ширина запрещенной зоны равна $0,73 \text{ эВ}$.
7. Определить будет ли находиться кристалл германия и кремния в состоянии пробоя, если приложено напряжение 8 кВ . Толщина кристалла 200 мкм .
8. Определить коэффициенты диффузии (D_n , D_p) электронов и дырок, длины

диффузионного смещения (L_n, L_p) в собственном Si при $T = 300\text{K}$. Известно, что $t_p = t_n = 10^{-5}\text{с}$.

9. Удельное сопротивление собственного германия равно $0,43\text{ мОм}$. Определить собственную концентрацию носителей Ge при $T = 300\text{K}$.

10. В кремний введены донорные и акцепторные примеси. Концентрации доноров и акцепторов соответственно равны $N_D = 50 \cdot 10^{13}$, $N_A = 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Определить удельное сопротивление.

11. Образец германия легирован сурьмой, так что один атом примеси приходится на $2 \cdot 10^6$ атомов Ge. ($N_{\text{Ge}} = 4,4 \cdot 10^{28}\text{ м}^{-3}$). Определить концентрацию электронов и дырок при температуре $T=300\text{ К}$, удельное сопротивление легированного полупроводника и коэффициенты диффузии электронов и дырок (D_n, D_p). N_{Ge} – плотность атомов в германии.

12. Определить ширину запрещенной зоны полупроводника при $T = 300\text{ К}$, полагая, что эффективная масса электрона равна эффективной массе дырки и равна $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}\text{ кг}$. $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}\text{ см}^{-3}$.

5.2. Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 3 семестре в форме зачета

Перечень вопросов к зачету

1. Химическая связь и атомная структура полупроводников. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах.

2. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь.

3. Структуры важнейших полупроводников – элементов AIV, AVI и соединений типов AIIIV, AIIIV, AIVBVI.

4. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Прimitивная ячейка. Ячейка Вигнера — Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

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

6. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.

7. Методы легирования полупроводников.

8. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

9. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.

10. Законы дисперсии для важнейших полупроводников.

11. Изознергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы.

Плотность состояний.

12. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле.

13. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. 14. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

15. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов.

16. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний.

17. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.

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

19. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.

20. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

21. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

22. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

23. Оптические явления в полупроводниках. 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.

24. 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).

25. 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.

26. Фотоэлектрические явления. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость. Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость. Фото-разогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект.

27. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования.

28. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.

29. 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.

30. Квантовый эффект Холла.

Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

Критерии оценивания для зачета

Оценка «зачтено». Систематическое посещение занятий в течение учебного года - аспирант посетил более 75% аудиторных занятий. В процессе обучения показал заинтересованность в предмете.

Оценка «не зачтено». Пропущено значительное количество занятий без уважительной причины - аспирант посетил менее 75% аудиторных занятий. В процессе обучения не проявил интереса к предмету.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Основная литература

1. Зегря, Г.Г. Основы физики полупроводников: учебное пособие / Г.Г. Зегря, В.И. Перель. – Москва: Физматлит, 2009. – 336 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394> (дата обращения: 01.09.2022).

2. Перлин, Е.Ю. Лекции по физике твердого тела: учебное пособие: [16+] / Е.Ю. Перлин, А.В. Иванов; Университет ИТМО. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. – Ч. 2. – 135 с.: ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=566772> (дата обращения: 01.09.2022).

3. Физика: введение в твердотельную электронику / А.Г. Захаров, Н.А. Какурина, Ю.Б. Какурин, А.С. Черепанцев; Южный федеральный университет, Инженерно-технологическая академия. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Южный федеральный университет, 2018. – 108 с.: ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=500163> (дата обращения: 01.09.2022).

6.2. Дополнительная литература

1. Бонч-Бруевич В. Л. Физика полупроводников / Бонч-Бруевич В. Л., С. Г. Калашников. – Москва: Наука, 1977. – 671 с.: ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=483346> (дата обращения: 01.09.2022). – Текст: электронный.

2. Зеегер, К. Физика полупроводников / К. Зеегер; пер. с англ. Ю. К. Пожелой. – Москва: Мир, 1977. – 612 с.: ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=483414> (дата обращения: 01.09.2022). – Текст: электронный.

6.3. Электронные образовательные ресурсы

1.	www.biblioclub.ru	Электронно-библиотечная система (ЭБС) Университетская библиотека онлайн	Регистрация через любой университетский компьютер. В дальнейшем предоставляется неограниченный индивидуальный доступ из любой точки, в которой имеется доступ к сети Интернет
2.	www.elibrary.ru	Российский информационный портал в области науки, технологии, медицины и образования	Свободный доступ

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы.