



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФГБОУ ВО «ИГУ»
Кафедра общей и экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ
Декан _____ Н.М. Буднев
«31» марта 2022 г.



Рабочая программа дисциплины (модуля)

Наименование дисциплины (модуля) **Б1.О.17 Физика полупроводников**

Направление подготовки **11.03.04 Электроника и нанoeлектроника**

профиль **"Измерение параметров и модификация свойств наноматериалов и наноструктур"**

Квалификация (степень) выпускника - Бакалавр

Форма обучения: очная

Согласовано с УМК физического факультета

Протокол № 33 от 31.03.2022

Зам. председателя

В.В. Чумак

Рекомендовано кафедрой
Общей и экспериментальной физики

Протокол № 6

От « 24 » марта 2022 г.

Зав.кафедрой

А.А. Гаврилюк

Иркутск 2022 г.

Содержание

	стр.
1. Цели и задачи дисциплины (модуля)	3
2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП.	3
3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля)	3
4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы	4
5. Содержание дисциплины (модуля)	4
5.1 Содержание разделов и тем дисциплины (модуля)	
5.2 Разделы дисциплины (модуля) и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами (модулями)	
5.3 Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятий	
6. Перечень семинарских, практических занятий, лабораторных работ, план самостоятельной работы студентов, методические указания по организации самостоятельной работы студентов.	7
7. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)	11
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля) :	13
а) основная литература;	
б) дополнительная литература;	
в) программное обеспечение;	
г) базы данных, поисково-справочные и информационные системы	
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля).	14
10. Образовательные технологии	14
11. Оценочные средства (ОС).	14

1. Цели и задачи дисциплины (модуля):

Целью курса «Физика полупроводников» является изучение природы полупроводников, физических процессов, которые в них протекают при различных внешних воздействиях, современных методов их описания. Кроме того, курс «Физика полупроводников» позволяет сформировать у студентов представления о принципах работы полупроводниковых приборов, способах их изготовления и применении.

Задачи дисциплины:

- изучение основных представлений физики полупроводников;
- ознакомление студентов с физическими основами работы современных полупроводниковых устройств;
- развитие способностей и интереса к исследованию полупроводниковых материалов и приборов на их основе, к самостоятельному мышлению и творческой деятельности.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП:

Учебная дисциплина «Физика полупроводников» входит в базовую часть дисциплин программы бакалавриата.

Дисциплина «Физика полупроводников» базируется на курсах общей физики, высшей математики, математического анализа и введение в специальность. Данная дисциплина имеет логические и содержательно-методические взаимосвязи с другими частями ОПОП, а именно с курсами, относящимися к базовой части обязательных дисциплин профессионального цикла (Физические основы электроники, Твердотельная электроника, Микро- и нанoeлектроника, Квантовая и оптическая электроника, Процессы микро- и нанотехнологий) и производственной практикой.

После изучения данной дисциплины студент должен понимать природу физических процессов, происходящих в полупроводниках, уметь выводить основные законы, описывающие свойства полупроводников, и применять свои знания на практике.

Общая трудоемкость курса - 4 зачетных единицы.

3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля):

Процесс изучения дисциплины (модуля) направлен на формирование следующих компетенций:

общепрофессиональные компетенции (ОПК): ОПК-1.

- способность использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности (ОПК-1);

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать:

Индекс компетенции	Индекс образовательного результата	Образовательный результат
ОПК-1	З-1	основные понятия, связанные с физикой полупроводников, процессами переноса носителей заряда в полупроводниковых системах, с основными явлениями на контактах полупроводника с металлами, полупроводниками, диэлектриками, с применением этих явлений в приборных устройствах

Уметь:

Индекс компетенции	Индекс образовательного результата	Образовательный результат
ОПК-1	У-1	применять полученные знания для анализа работы

		приборных объектов, использовать физические законы для предсказания поведения физических параметров полупроводниковых объемных и контактных приборов, оперировать физическими и технологическими терминами и величинами, анализировать задачи по переносу носителей заряда в полупроводниковых системах различной природы;
--	--	--

Владеть:

Индекс компетенции	Индекс образовательного результата	Образовательный результат
ОПК-1	В-1	информацией об областях применения полупроводников в приборных системах, а также информацией о методах измерения основных параметров полупроводников;

4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы (разделяется по формам обучения)

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц	Семестры				
						5
Контактная работа (всего)	76/2,1					76/2,1
В том числе:						
Лекции	34/0,94					34/0,94
Практические занятия (ПЗ)	34/0,94					34/0,94
Лабораторные работы						
Контроль общих (КО)	8/0,22					8/0,22
Самостоятельная работа (всего)	68/1,9					68/1,9
В том числе:						
Курсовой проект (работа)						
Расчетно-графические работы						
Реферат (при наличии)						
<i>Другие виды самостоятельной работы</i>						
Подготовка докладов по темам, решение задач, подготовка к зачету	68/1,9					68/1,9
Вид промежуточной аттестации: зачет	Зачет					Зачет
Вид итоговой аттестации:						
Общая трудоемкость: часы	144					144
зачетные единицы	4					4

Примечание: Контактная работа с бакалавром включает аудиторную нагрузку (76ч).

5. Содержание дисциплины (модуля)

Физика полупроводников – область фундаментальной и прикладной науки и техники, включающая экспериментальные и теоретические исследования физических свойств полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе (включая гетероструктуры, МОП структуры и барьеры Шоттки), а также, происходящих в них физических явлений, разработку и исследование технологических процессов получения полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, создание оригинальных полупроводниковых приборов и интегральных устройств.

Дисциплина «Физика полупроводников» рассматривает физические процессы,

происходящие в объеме полупроводника, на его поверхности и на границе полупроводника с другими материалами.

5.1. Содержание разделов и тем дисциплины (модуля).

Тема 1. Введение.

Роль полупроводников в современной физике и технике. Вещества, относящиеся к полупроводникам. Особенности их кристаллической структуры и характер химической связи. Зонная структура полупроводниковых материалов. Основные особенности электрических свойств полупроводников. Влияние примесей. Основы практического использования полупроводников.

Тема 2. Статистика носителей заряда в полупроводниках.

Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака. Невырожденные, вырожденные и примесные полупроводники. Степень заполнения примесных уровней. Концентрация электронов и дырок. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Закон действующих масс. Уравнение электронейтральности. Температурная зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси, в компенсированном полупроводнике.

Тема 3. Кинетические явления в полупроводниках.

Электропроводность полупроводников в слабых электрических полях. Подвижность электронов и дырок. Электропроводность собственного и примесного полупроводников. Температурная зависимость подвижности и электропроводности при различных механизмах рассеяния носителей заряда. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводнике. Соотношения Эйнштейна. Закон полного тока. Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.

Тема 4. Контактные явления в полупроводниках. Электрические переходы.

4.1 Электронно-дырочный переход. Распределение примесей, объемного заряда, свободных носителей, напряженности поля и потенциала на $p-n$ - переходе. Энергетические диаграммы $p-n$ - перехода в равновесном состоянии и под влиянием внешнего поля. Выпрямление на $p-n$ -переходе. Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода. Пробой $p-n$ -перехода. Дифференциальные сопротивление и емкость $p-n$ -перехода.

4.2 Контакт «металл-полупроводник». Переход Шоттки. Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Выпрямление на контакте металл-полупроводник.

4.3 Контакт между полупроводниками одного типа проводимости.

4.4 Гетеропереходы.

4.5 Свойства омических переходов.

Тема 5. Поверхностные явления в полупроводниках.

Уравнение Пуассона. Поверхностный потенциал. Поверхностная проводимость. Эффект поля. МДП-структура. Емкость МДП-структуры.

Тема 6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления.

Тема 7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.

Спектр отражения и спектр поглощения оптического излучения. Собственное поглощение света, прямые и не прямые переходы. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников. Экситонное поглощение, поглощение свободными носителями заряда, примесное и решеточное поглощение. Фоторезистивный эффект, квантовый выход, коэффициент усиления. Зависимость фототока от

интенсивности света, кинетика фототока.

5.2 Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

Курс «Физика полупроводников» является основой для изучения следующих дисциплин профессионального цикла:

№ п/п	Наименование обеспечиваемых (последующих) дисциплин	№ № разделов и тем данной дисциплины, необходимых для изучения обеспечиваемых (последующих) дисциплин (вписываются разработчиком)						
		P1	P2	P3	P4	P5		
1.	Физические основы электроники	P1	P2	P3	P4	P5		
2.	Твердотельная электроника	P1	P2	P3	P4	P5		
3.	Микро- и нанoeлектроника	P1	P2	P3	P4	P5		
4.	Квантовая и оптическая электроника	P1	P2	P3	P4	P5		
5.	Процессы микро- и нанотехнологий	P1	P2	P3	P4	P5		

5.3. Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела Наименование темы	Виды занятий в часах					
		Лекц.	Практ. зан.	Лаб	КО	СР	Всего
1.	Т.1. Введение.	2	2			4	4
2.	Т.2. Статистика носителей заряда в полупроводниках	6	6			12	24
3.	Т.3. Кинетические явления в полупроводниках	4	4			8	16
4.	Т.4. Контактные явления в полупроводниках.	6	6			12	24
5.	Т.5. Поверхностные явления в полупроводниках.	6	6			12	24
6.	Т.6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления.	4	4			8	16
7.	Т.7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.	6	6			12	24
	Итого:	34	34		8	68	144

6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудо-емкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1.	Т. 1. Введение.	Пз. 1. Роль полупроводников в современной физике и технике. Вещества, относящиеся к полупроводникам. Особенности их кристаллической структуры и характер химической связи. Зонная структура полупроводниковых материалов. Основные особенности электрических свойств полупроводников. Влияние примесей. Основы практического использования полупроводников.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
2.	Т. 2. Статистика носителей заряда в полупроводниках	Пз.2. Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака. Невырожденные, вырожденные и примесные полупроводники.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
3.		Пз.3. Степень заполнения примесных уровней. Концентрация электронов и дырок. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Закон действующих масс. Уравнение электронейтральности.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
4.		Пз.4. Температурная зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси, в компенсированном полупроводнике.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
5.	Т. 3. Кинетические явления в полупроводниках.	Пз.5. Электропроводность полупроводников в слабых электрических полях. Подвижность электронов и дырок. Электропроводность собственного и примесного полупроводников. Температурная зависимость подвижности и электропроводности при различных механизмах рассеяния носителей заряда. Уравнение непрерывности.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
6.		Пз. 6. Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводнике. Соотношения Эйнштейна. Закон полного тока. Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
7.	Т. 4. Контактные явления в полупроводниках. Электрические переходы.	Пз.7. <i>Электронно-дырочный переход.</i> Распределение примесей, объемного заряда, свободных носителей, напряженности поля и потенциала на <i>p-n</i> - переходе. Энергетические диаграммы <i>p-n</i> - перехода в равновесном состоянии и под влиянием внешнего поля. Выпрямление на <i>p-n</i> -переходе. Вольт-амперная характеристика <i>p-n</i> -перехода. Пробой <i>p-n</i> -перехода. Дифференциальное сопротивление и емкость <i>p-n</i> -перехода.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
8.		Пз.8. <i>Контакт «металл-полупроводник». Переход Шоттки.</i> Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Выпрямление на контакте металл-полупроводник.	1	Письменный текущий контроль	ОПК-1
9.		Пз.9. <i>Контакт между</i>	2	Письменный	ОПК-1

		<i>полупроводниками одного типа проводимости.</i> <i>Свойства омических переходов.</i>		текущий контроль	
10.		Пз.10. Гетеропереходы.	1	Письменный текущий контроль	ОПК-1
11.	Т. 5. Поверхностные явления в полупроводниках.	Пз.11. Уравнение Пуассона. Поверхностный потенциал.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
12.		Пз.12. Поверхностная проводимость. Эффект поля	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
13.		Пз.13. МДП-структура. Емкость МДП-структуры.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
14.	Т. 6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления.	Пз.14. Гальваномагнитные явления. Эффект Холла в примесных и собственных полупроводниках. Угол Холла. Применение эффекта Холла. Квантовый эффект Холла. Изменение сопротивления полупроводников в магнитном поле.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
15.		Пз.15. Термоэлектрические и термомагнитные явления. Явление Зеебека. Контактная и объемная составляющие коэффициента термо-ЭДС полупроводников. Эффекты Пельтье и Томсона. Связь между термоэлектрическими коэффициентами. Термомагнитный эффект (эффект Нернста-Эттингсгаузена).	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
16.	Т. 7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.	Пз.16. Спектр отражения и спектр поглощения оптического излучения. Собственное поглощение света, прямые и не прямые переходы. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников. Экситонное поглощение, поглощение свободными носителями заряда, примесное и решеточное поглощение.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
17.		Пз.17. Фоторезистивный эффект, квантовый выход, коэффициент усиления. Зависимость фототока от интенсивности света, кинетика фототока.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1
18.		Пз.18. Лазеры.	2	Письменный текущий контроль	ОПК-1

6.1. План самостоятельной работы студентов

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1	Т.1.	Работа с учебником, справочной литературой, первоисточника	Повторение и углубленное изучение учебного материала лекции, ПЗ с использованием	Источники 1-5 из основной и 1-6 из дополнительной литературы; Самостоятельный	4
2-4	Т.2.				12
5-6	Т.3.				8
7-10	Т.4.				12
11-13	Т.5.				12

14-15	Т.6.	ми, конспектом.	литературы, Интернет - ресурсов	поиск литературы на образовательных ресурсах, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ	8
16-18	Т.7.				12

6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа бакалавров – индивидуальная учебная деятельность, осуществляемая без непосредственного руководства преподавателя (научного руководителя (консультанта)), в ходе которой бакалавр активно воспринимает, осмысливает полученную информацию, решает теоретические и практические задачи. В процессе проведения самостоятельной работы формируются компетенции ОПК-1.

На самостоятельную работу выносятся следующие вопросы по темам дисциплины:

Т.1. - Т.2. *Физика полупроводников* (практические занятия - 8 час., самостоятельная работа-16 час.).

Собственная проводимость полупроводников. Электроны и дырки. Равновесная концентрация носителей заряда, уровень Ферми. Зависимость концентрации носителей от температуры. Примесные уровни и примесная проводимость полупроводников. Акцепторные и донорные примесные атомы. Энергия активации. Уравнение баланса носителей заряда в полупроводнике. Температурная зависимость равновесной концентрации примесных носителей заряда. Закон действующих масс. Компенсированные полупроводники. Неравновесные носители заряда. Понятие о квазиуровнях Ферми. Рекомбинация, ее механизмы. Скорость рекомбинации и время жизни носителей заряда. Излучательная рекомбинация. Основные полупроводники, применяемые в микроэлектронике (кремний, германий, арсенид галлия), их свойства. Диффузионная и дрейфовая составляющие тока. Коэффициент диффузии носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Монополярная и биполярная диффузия носителей заряда в полупроводниках. Уравнение непрерывности.

Т.3. Электропроводность твердых тел (практические занятия – 4 час., самостоятельная работа-8 час.).

Классическая теория электропроводности, ее недостатки. Влияние электрического поля на функцию распределения носителей заряда. Дрейфовая скорость. Подвижность носителей заряда. Уравнения Ланжевена. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электрон-фононное рассеяние. Рассеяние на дефектах кристаллической решетки. Температурные зависимости подвижности и концентрации носителей заряда в металлах. Температурная зависимость удельной проводимости металлов. Основные механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в полупроводниках. Температурная зависимость удельной проводимости полупроводников. Эффекты сильного поля. Типы вольтамперных характеристик в полупроводниках. ВАХ S и N типа. Эффект Ганна. Понятие о доменах. СВЧ-генераторы на эффекте Ганна.

Т.4. Контактные явления. (практические занятия - 6 час., самостоятельная работа-12 час.).

Работа выхода. Из металлов и полупроводников. Термоэлектронная эмиссия. Контакт двух металлов. Контактная разность потенциалов. Контакт металл-полупроводник в равновесном и неравновесном состояниях. Приконтактные слои обеднения, обогащения, инверсии. Эффект Шоттки. Толщина обедненного слоя. Распределение потенциала. Диод Шоттки. ВАХ диода Шоттки. P-n переход, его

энергетические диаграммы в равновесном и неравновесном состоянии. Обедненный слой, электрические поля в обедненном слое. Резкий и плавный р-п переходы. Толщина обедненного слоя. Контактная разность потенциалов. Обратный ток р-п перехода, его составляющие. ВАХ р-п перехода. Зарядная и диффузионная емкости р-п перехода. Пробой р-п перехода и его механизмы (лавинный, туннельный, тепловой). Полупроводниковые приборы на основе р-п перехода. Выпрямительные диоды. Туннельный диод. Энергетические диаграммы, принцип действия, ВАХ. Лавинно-пролетный диод. Лавинное умножение и дрейф. Характеристики лавинно-пролетных диодов. Структура и физика работы биполярного транзистора, его энергетическая диаграмма. Инжекция носителей. Активный режим, режимы насыщения и отсечки. Схема с общей базой, общим эмиттером и коллектором. Коэффициент усиления по току. Эффективности эмиттера и коллектора, коэффициент переноса неосновных носителей заряда в базе. Переходные процессы в биполярном транзисторе. Частота отсечки.

Т.5. Поверхностные явления в полупроводниках (практические занятия - 6 час., самостоятельная работа – 12 час.).

Поверхностные состояния в полупроводнике. Поверхностная рекомбинация. Приповерхностный слой объемного заряда. Поверхностная проводимость. Эффект поля.

МДП-структуры. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур. Полевые транзисторы. Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом. ВАХ этих приборов. Влияние зависимости подвижности от поля. Ток насыщения, крутизна характеристики.

МДП (МОП)-транзисторы. Идеальная МДП-структура. Эффект поля. МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналом. ВАХ МДП-транзистора. Режимы обеднения, обогащения, инверсии. Приближенная модель и ее уточнение. Роль поверхностных состояний. Разновидности МОП-транзисторов. Высокочастотные МОП-транзисторы. Переходные процессы в полевых транзисторах. Эквивалентная схема МОП-транзистора.

Т.6. Гальваномагнитные, термомагнитные и термоэлектрические явления (практические занятия - 4 час., самостоятельная работа - 8 час.).

Движение носителей заряда при наличии магнитного поля. Магнетосопротивление, эффект Холла и его применения. Эффекты Нернста, Риги-Ледюка, Эттинсгаузена. Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона, области их применения.

Т.7. Фотоэлектрические явления в полупроводниках (практические занятия - 6 час., самостоятельная работа - 12 час.).

Спектры испускания и поглощения. Типы центров поглощения в полупроводниках. Понятие об экситонах. Люминесценция полупроводников. Основные законы люминесценции. Виды люминесценции. Фотопроводимость. Спектральная зависимость фотопроводимости. Фотопроводимость при импульсном освещении. Фотоэлектрические эффекты. Устройство, принцип действия, основные характеристики фоторезистора, фотодиода, фотоэлемента, фототранзистора. Светодиоды. Фотовольтаический эффект. Понятие о гетеропереходах. Солнечные батареи. Оптические системы в микроэлектронике. Оптические волноводы. Принцип действия лазеров и мазеров. Полупроводниковые лазеры.

Дополнительно:

1. Основные виды полупроводниковых диодов.
2. Биполярные транзисторы.
3. Полевые транзисторы.
4. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы.
5. Полупроводниковые термоэлектрические и гальваномагнитные приборы.

6. Технология изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем - типовые технологические процессы (Подготовительные операции. Эпитаксия. Термическое окисление. Диффузия. Ионная имплантация. Травление. Техника масок. Металлизация.)

Контроль самостоятельной работы проводится на практических занятиях по окончании Т.3, Т.5, Т.7.

7. Примерная тематика докладов и рефератов

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 A^{IV} , A^{VI} и соединений типов $A^{III}B^V$, $A^{II}B^VI$, $A^{IV}B^{VI}$
4. 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.
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. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.
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. Фоторазогрев 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.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля):

а) основная литература

1. Шалимова, Клавдия Васильевна. Физика полупроводников [Электронный ресурс]: учебник / К. В. Шалимова. - Москва : Лань, 2010. - 390, [1] с. [1] с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ. - Предм. указ.: с.383-387. - ISBN 978-5-8114-0922-8. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=648

2. Старосельский, Виктор Игоревич. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. подготовки 210100 "Электроника и микроэлектроника" / В. И. Старосельский. - ЭВК. - М.: Юрайт: ИД Юрайт, 2011. - (Основы наук). - Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-9916-0808-4. - ISBN 978-5-9692-0962-6.

3. Ансельм, Андрей Иванович. Введение в теорию полупроводников [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А. И. Ансельм. - Москва: Лань, 2008. - 618 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике) (Лучшие классические учебники). - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-8114-0762-0.

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=693

4. Лебедев, А. И. Физика полупроводниковых приборов [Текст]: [учеб. пособие] / А. И. Лебедев. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 488 с. ; нет. - Режим доступа: ЭБС "Рукопт". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-9221-0995-6. <http://rucont.ru/efd/152043>

5. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г. И. Епифанов. - Москва : Лань, 2011. - 288 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ. - Библиогр.: с. 282-283. - ISBN 978-5-8114-1001-9.

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2023

б) дополнительная литература

1. Пасынков, Владимир Васильевич. Полупроводниковые приборы [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. - 8-е изд., испр. - СПб. : Лань, 2006. - 479 с. : ил. ; 21 см. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 5-8114-0368-2 (26 экз.)

2. Степаненко, Игорь Павлович. Основы микроэлектроники [Текст] : учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Лаборатория Базовых Знаний, Физматлит; СПб.: Невский Диалект, 2001. - 488 с. : ил. ; 22 см. - (Технический университет). - ISBN 5932080450. (28 экз.)

3. Антипов, Б. Л. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы : Учеб. для студ. вузов / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. - 3-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2003. - 208 с. : ил. ; 20 см. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 207. - ISBN 5-8114-0410-7. (10 экз.)

4. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики [Электронный ресурс] / В. С. Сорокин. - Москва : Лань", 2015. - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-8114-2003-2. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=67462

5. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников [Текст] : учеб. пособие для физ. спец. вузов / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. - М. : Наука, 1990. - 685 с.: ил. ; 22 см. - ISBN 5020140325 : (в пер.) (20 экз.)

в) программное обеспечение

1. Microsoft PowerPoint

Сверено с №5 ЧИТ

г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

1. Поисковые системы Google, Yandex.
2. Электронные ресурсы доступные по логину и паролю, предоставляемые Научной библиотекой ИГУ.
3. Научная электронная библиотека www.eLibrary.ru (доступ к полным текстам ряда научных журналов с 2007 по настоящее время)
4. Научные публикации в реферативных журналах по актуальным проблемам физики твердого тела и физики полупроводников, твердотельной электроники и микроэлектроники. Электронные версии журналов: “Физика твердого тела”, “Журнал технической физики”, “Письма в журнал технической физики”, “Физика и техника полупроводников” <http://journals.ioffe.ru>.

Интернет-ресурсы:

1. Гуртов В.А. Твердотельная электроника [Электрон. ресурс]: учебное пособие. – Электрон. дан. – Петрозаводск: каф. физики тв. тела ПетрГУ, 2003-2010. – URL: <http://dssp.petrSU.ru/book/main.shtml>, доступ свободный.
2. Гуртов В.А., Климов И.В., Коваленко В.В. Введение в теорию транзисторов. – [Электрон. ресурс]: учебное пособие. – Электрон. дан. – Петрозаводск: каф. физики тв. тела ПетрГУ, 2003-2010 URL: http://dssp.karelia.ru/~vgurt/moel2/Transistors/Diplom_Kovalenko/index.htm , доступ свободный.
3. Гардин Ю.Е., Гуртов В.А., Кузнецов С.Н. и др. Изучение электрофизических параметров полевого МДП транзистора: Методические указания к лабораторной работе. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003.– 15 с. - Электрон. версия печат. публ.– URL: http://dssp.petrSU.ru/files/meths/mdp_.pdf, доступ свободный.
4. Транзисторы. – [Электрон. ресурс]: учебное пособие. – Электрон. дан. – Московский государственный технический университет «МАМИ», кафедра «Автоматика и процессы управления». – URL: <http://www.mami.ru/kaf/aipu/theme2.php>, доступ свободный.
5. Воронков Э.Н. и др. Твердотельная электроника [Электрон. ресурс]: автоматизир. учебный курс. – Электрон. дан.. – М: Центр системной интеграции ГосНИИСИ в МЭИ (ТУ), 2002. – URL: <http://www.pilab.ru/csi/AUK/Microelectr/E&m.asp>, доступ свободный.

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля):

Программа для тестирования, офисное оборудование для оперативного размножения иллюстративного и раздаточного материалов для практических занятий и контрольных работ.

10. Образовательные технологии:

№ п/п	Виды учебной работы	Образовательные технологии
1-18	Практическое занятие	Занятие – разбор теоретических вопросов, решение задач, выступления с докладами по темам, данным для самостоятельного рассмотрения.

11. Оценочные средства (ОС):

11.1. Оценочные средства для входного контроля

Не предусмотрено.

11.2. Оценочные средства текущего контроля

Текущий контроль осуществляется в устной и письменной форме на ПЗ.1-ПЗ.18 при выполнении студентами учебных заданий - решении задач и выполнении контрольных (тестовых) работ на протяжении всего курса. Текущий контроль направлен на выявление сформированности компетенции ОПК-1.

Письменный текущий контроль проводится в форме теста или контрольной работы по изучаемым темам.

11.3 Оценочные средства для промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация направлена на проверку сформированности компетенции ОПК-1 и проводится в форме зачета. Форма проведения зачета – устный или письменный в виде теста. Зачет проводится во время экзаменационных сессий. Вопросы для самостоятельной подготовки студентов к зачету приведены в приложении 1.

Критерии	Оценка			
	«Зачтено»			«Не зачтено»
	«Отлично»	«Хорошо»	«Удовлетворительно»	«Неудовлетворительно»
Знание	Всесторонние глубокие знания	Знание материала в пределах программы	Отмечены пробелы в усвоении программного материала	Не знает основное содержание дисциплины
Понимание	Полное понимание материала, приводит примеры, дополнительные вопросы не требуются	Понимает материал, приводит примеры, но испытывает затруднения с выводами, однако достаточно полно отвечает на дополнительные вопросы	Суждения поверхностны, содержат ошибки, примеры не приводит, ответы на дополнительные вопросы неуверенные	С трудом формулирует свои мысли, не приводит примеры, не дает ответа на дополнительные вопросы
Применение проф. терминологии	Дает емкие определения основных понятий, корректно использует профессиональную терминологию	Допускает неточности в определении понятий, не в полном объеме использует профессиональную терминологию	Путает понятия, редко использует профессиональную терминологию	Затрудняется в определении основных понятий дисциплины, некорректно использует профессиональную терминологию
Соблюдение норм литературного языка	Соблюдает нормы литературного языка, преобладает научный стиль изложения	Соблюдает нормы литературного языка, допускает единичные ошибки	Допускает множественные речевые ошибки при изложении материала	Косноязычная речь искажает смысл ответа

Программа составлена в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки **11.03.04 Электроника и наноэлектроника**.

Разработчики:



к.ф.-м.н., доцент Морозова Н.В.

Программа рассмотрена на заседании **кафедры общей и экспериментальной физики ИГУ**

« 24 » марта 2022 г.

Протокол № 6

Зав.кафедрой



д.ф.-м..н. Гаврилюк А.А.

Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.

Примерный перечень вопросов и заданий к зачету

1. *Физика полупроводников.* Энергетический спектр кристалла. Энергетические уровни и зоны. Проводники, полупроводники и диэлектрики. Вещества, относящиеся к полупроводникам. Особенности их кристаллической и зонной структуры, характер химической связи. Основные особенности электрических свойств полупроводников. Влияние примесей. Основы практического использования полупроводников.

2. *Статистика носителей заряда в полупроводниках.*

Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака. Невырожденные, вырожденные и примесные полупроводники. Степень заполнения примесных уровней. Концентрация электронов и дырок. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Закон действующих масс. Уравнение электронейтральности. Температурная зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси, в компенсированном полупроводнике.

3. *Кинетические явления в полупроводниках.*

Электропроводность полупроводников в слабых электрических полях. Подвижность электронов и дырок. Электропроводность собственного и примесного полупроводников. Температурная зависимость подвижности и электропроводности при различных механизмах рассеяния носителей заряда. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводнике. Соотношения Эйнштейна. Закон полного тока. Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.

4. *Контактные явления в полупроводниках. Электрические переходы:*

4.1 *Электронно-дырочный переход.* Распределение примесей, объемного заряда, свободных носителей, напряженности поля и потенциала на *p-n* - переходе. Энергетические диаграммы *p-n* - перехода в равновесном состоянии и под влиянием внешнего поля. Выпрямление на *p-n*-переходе. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода. Пробой *p-n*-перехода. Дифференциальное сопротивление и емкость *p-n*-перехода.

4.2 *Контакт «металл-полупроводник». Переход Шоттки.* Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Выпрямление на контакте металл-полупроводник.

4.3 *Контакт между полупроводниками одного типа проводимости.*

4.4 *Гетеропереходы.*

4.5 *Свойства омических переходов.*

5. *Поверхностные явления в полупроводниках.* Уравнение Пуассона. Поверхностный потенциал. Поверхностная проводимость. Эффект поля. МДП-структура. Емкость МДП-структуры.

6. *Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления.*

7. *Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.* Спектр отражения и спектр поглощения оптического излучения. Собственное поглощение света, прямые и непрямые переходы. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников. Экситонное поглощение, поглощение свободными носителями заряда, примесное и решеточное поглощение. Фоторезистивный эффект, квантовый выход, коэффициент усиления. Зависимость фототока от интенсивности света, кинетика фототока.