

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Физика полупроводников и диэлектриков

Код модуля
1159301(1)

Модуль
Физика и технологии микро- и нанoeлектроники

Екатеринбург

Оценочные материалы составлены автором(ами):

№ п/п	Фамилия, имя, отчество	Ученая степень, ученое звание	Должность	Подразделение
1	Германенко Александр Викторович	доктор физико- математических наук, доцент	Профессор	физики конденсированного состояния и наноразмерных систем

Согласовано:

Управление образовательных программ

Е.С. Комарова

Авторы:

- Германенко Александр Викторович, Профессор, физики конденсированного состояния и наноразмерных систем

1. СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ **Физика полупроводников и диэлектриков**

1.	Объем дисциплины в зачетных единицах	4	
2.	Виды аудиторных занятий	Лекции Практические/семинарские занятия	
3.	Промежуточная аттестация	Экзамен	
4.	Текущая аттестация	Контрольная работа	2

2. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ИНДИКАТОРЫ) ПО ДИСЦИПЛИНЕ МОДУЛЯ **Физика полупроводников и диэлектриков**

Индикатор – это признак / сигнал/ маркер, который показывает, на каком уровне обучающийся должен освоить результаты обучения и их предъявление должно подтвердить факт освоения предметного содержания данной дисциплины, указанного в табл. 1.3 РПМ-РПД.

Таблица 1

Код и наименование компетенции	Планируемые результаты обучения (индикаторы)	Контрольно-оценочные средства для оценивания достижения результата обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-1 -Способен формулировать и решать научно-исследовательские, технические, организационно-экономические и комплексные задачи, применяя фундаментальные знания	З-1 - Соотносить проблемную область с соответствующей областью фундаментальных и общеинженерных наук З-2 - Привести примеры терминологии, принципов, методологических подходов и законов фундаментальных и общеинженерных наук, применимых для формулирования и решения задач проблемной области знания У-2 - Критически оценить возможные способы решения задач проблемной области, используя знания фундаментальных и общеинженерных наук	Контрольная работа № 2 Контрольная работа №1 Лекции Практические/семинарские занятия Экзамен

3. ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ МОДУЛЯ В БАЛЬНО-РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЕ (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА БРС)

3.1. Процедуры текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

1. Лекции: коэффициент значимости совокупных результатов лекционных занятий – 0.80		
Текущая аттестация на лекциях	Сроки – семестр, учебная неделя	Максимальная оценка в баллах
<i>контрольная работа № 1</i>	2,8	50
<i>контрольная работа № 2</i>	2,14	50
Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лекциям – 0.50		
Промежуточная аттестация по лекциям – экзамен		
Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по лекциям – 0.50		
2. Практические/семинарские занятия: коэффициент значимости совокупных результатов практических/семинарских занятий – 0.20		
Текущая аттестация на практических/семинарских занятиях	Сроки – семестр, учебная неделя	Максимальная оценка в баллах
<i>выполнение заданий на практических занятиях</i>	2,16	100
Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по практическим/семинарским занятиям – 1.00		
Промежуточная аттестация по практическим/семинарским занятиям – нет		
Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по практическим/семинарским занятиям – не предусмотрено		
3. Лабораторные занятия: коэффициент значимости совокупных результатов лабораторных занятий – не предусмотрено		
Текущая аттестация на лабораторных занятиях	Сроки – семестр, учебная неделя	Максимальная оценка в баллах
Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лабораторным занятиям – не предусмотрено		
Промежуточная аттестация по лабораторным занятиям – нет		
Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по лабораторным занятиям – не предусмотрено		
4. Онлайн-занятия: коэффициент значимости совокупных результатов онлайн-занятий – не предусмотрено		
Текущая аттестация на онлайн-занятиях	Сроки – семестр, учебная неделя	Максимальная оценка в баллах

Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по онлайн-занятиям -не предусмотрено
Промежуточная аттестация по онлайн-занятиям –нет
Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по онлайн-занятиям – не предусмотрено

3.2. Процедуры текущей и промежуточной аттестации курсовой работы/проекта

Текущая аттестация выполнения курсовой работы/проекта	Сроки – семестр, учебная неделя	Максимальная оценка в баллах
Весовой коэффициент текущей аттестации выполнения курсовой работы/проекта– не предусмотрено		
Весовой коэффициент промежуточной аттестации выполнения курсовой работы/проекта– защиты – не предусмотрено		

4. КРИТЕРИИ И УРОВНИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ МОДУЛЯ

4.1. В рамках БРС применяются утвержденные на кафедре/институте критерии (признаки) оценивания достижений студентов по дисциплине модуля (табл. 4) в рамках контрольно-оценочных мероприятий на соответствие указанным в табл.1 результатам обучения (индикаторам).

Таблица 4

Критерии оценивания учебных достижений обучающихся

Результаты обучения	Критерии оценивания учебных достижений, обучающихся на соответствие результатам обучения/индикаторам
Знания	Студент демонстрирует знания и понимание в области изучения на уровне указанных индикаторов и необходимые для продолжения обучения и/или выполнения трудовых функций и действий, связанных с профессиональной деятельностью.
Умения	Студент может применять свои знания и понимание в контекстах, представленных в оценочных заданиях, демонстрирует освоение умений на уровне указанных индикаторов и необходимых для продолжения обучения и/или выполнения трудовых функций и действий, связанных с профессиональной деятельностью.
Опыт /владение	Студент демонстрирует опыт в области изучения на уровне указанных индикаторов.
Другие результаты	Студент демонстрирует ответственность в освоении результатов обучения на уровне запланированных индикаторов. Студент способен выносить суждения, делать оценки и формулировать выводы в области изучения. Студент может сообщать преподавателю и коллегам своего уровня собственное понимание и умения в области изучения.

4.2 Для оценивания уровня выполнения критериев (уровня достижений обучающихся при проведении контрольно-оценочных мероприятий по дисциплине модуля) используется универсальная шкала (табл. 5).

Таблица 5

Шкала оценивания достижения результатов обучения (индикаторов) по уровням

Характеристика уровней достижения результатов обучения (индикаторов)				
№ п/п	Содержание уровня выполнения критерия оценивания результатов обучения (выполненное оценочное задание)	Шкала оценивания		
		Традиционная характеристика уровня		Качественная характеристи ка уровня
1.	Результаты обучения (индикаторы) достигнуты в полном объеме, замечаний нет	Отлично (80-100 баллов)	Зачтено	Высокий (В)
2.	Результаты обучения (индикаторы) в целом достигнуты, имеются замечания, которые не требуют обязательного устранения	Хорошо (60-79 баллов)		Средний (С)
3.	Результаты обучения (индикаторы) достигнуты не в полной мере, есть замечания	Удовлетворительно (40-59 баллов)		Пороговый (П)
4.	Освоение результатов обучения не соответствует индикаторам, имеются существенные ошибки и замечания, требуется доработка	Неудовлетворитель но (менее 40 баллов)	Не зачтено	Недостаточный (Н)
5.	Результат обучения не достигнут, задание не выполнено	Недостаточно свидетельств для оценивания		Нет результата

5. СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНО-ОЦЕНОЧНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ МОДУЛЯ

5.1. Описание аудиторных контрольно-оценочных мероприятий по дисциплине модуля

5.1.1. Лекции

Самостоятельное изучение теоретического материала по темам/разделам лекций в соответствии с содержанием дисциплины (п. 1.2. РПД)

5.1.2. Практические/семинарские занятия

Примерный перечень тем

1. Классификация полупроводников. Технологии выращивания полупроводниковых материалов и гетероструктур.

2. Решение задачи о нахождении энергетического спектра одномерной периодической решетки. Анализ спектра в модели Латтинжера. Исследование влияния одноосного и всестороннего сжатия на спектр носителей.

3. Спектр и волновые функции мелких донорных и акцепторных состояний. Спектр слабо- и сильнолегированных полупроводников.

4. Статистика полупроводников. Решение уравнения электронейтральности в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров. Температурная зависимость концентрации электронов в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов при одновременном наличии донорной и акцепторной примеси.

5. Анализ эффект Холла при наличии одного и двух типов носителей заряда в полупроводнике.

6. Расчет температурных зависимостей подвижности носителей заряда при различных механизмах рассеяния.

7. Определение концентрации и эффективной массы из осцилляций Шубникова-де Газа. Определение эффективной массы из МФР.

Примерные задания

1. Основные свойства полупроводников. Основные открытия и достижения в науке и технологии, которые сыграли решающую роль в достижении современного состояния физики полупроводников, как фундаментальной науки. Методы получения полупроводниковых материалов. Методы легирования. Рост самоорганизующихся квантовых точек. Методы получения тонких слоев.

2. Найти энергию ионизации мелких донорных состояний в GaAs. Найти энергию ионизации акцепторных состояний в GaAs, InSb, учитывая вырожденный характер валентной зоны. Найти энергию ионизации акцептора в бесщелевом полупроводнике HgTe, обсудить необычность ситуации и возможные последствия с точки зрения поведения электропроводности и эффекта Холла при изменении температуры. Оценить концентрацию перехода Мотта для электронов и дырок в арсениде галлия.

3. Построить функцию Ферми-Дирака при различных температурах. Вывести формулы и построить зависимость плотности состояний от энергии для параболического и кейновского законов дисперсии. Построить зависимость заселенности электронных состояний для вырожденного и невырожденного распределения электронов. Написать программу для расчета интегралов Ферми. Оценить погрешность, возникающую при использовании приближенных формул из учебника по физике полупроводников в области промежуточного вырождения электронного газа. Решить уравнение электронейтральности для собственного арсенида галлия и построить температурную зависимость уровня Ферми и концентрации электронов (дырок). Построить примерный ход уровня Ферми в примесном полупроводнике при наличии и отсутствии компенсирующей примеси. Обсудить получившееся отличие. Построить качественную температурную зависимость электронов в примесном полупроводнике при разной степени компенсации. Обсудить характерные особенности. Построить качественный ход температурной зависимости концентрации электронов и дырок в полупроводниках n- и p-типов в широкой области температур. Построить температурную зависимость концентрации электронов и дырок в бесщелевом полупроводнике HgTe. Обсудить различие с полупроводниками с открытой щелью.

4. По имеющимся величинам подвижности и концентрации электронов найти удельное сопротивление материала. Зная геометрию образца и его параметры, найти падение напряжения возникающее на нем при пропускании электрического тока определенной силы. Объяснить физический смысл понятия подвижность. Объяснить разницу между понятиями транспортное время релаксации импульса и время релаксации импульса. Показать, что электропроводность германия и кремния является скалярной величиной, несмотря на то, что минимумы зоны проводимости в этих материалах являются анизотропными. Объяснить

эффект Холла. Уметь найти эдс Холла в материале с заданными параметрами, если задана геометрия эксперимента и его условия (магнитное поле и сила тока, протекающего через образец). Объяснить смену знака эффекта Холла при изменении температуры в узкозонных полупроводниках р-типа. Объяснить отсутствие такой смены в полупроводниках п-типа. Построить температурную зависимость коэффициента Холла (в малых магнитных полях) и проводимости в конкретном материале с заданным уровнем легирования, используя знания энергетического спектра.

5. Построить зависимость тензоров сопротивления и проводимости от магнитного поля в случае вырожденного полупроводника. Объяснить явление магнитосопротивления в невырожденном электронном газе. Объяснить возникновение зависимости от магнитного поля сопротивления и коэффициента Холла в вырожденном полупроводнике с двумя (или более) типами носителей заряда. Построить температурную зависимость подвижности электронов в арсениде галлия с заданной концентрацией ионизированной примеси. Сравнить расчет с экспериментальными данными. Объяснить имеющееся различие (или совпадение). Найти по заданной величине подвижности время транспортное время релаксации. Зная величину коэффициента Холла и удельное сопротивление образца заданного материала, найти концентрацию носителей, подвижность и время релаксации импульса.

6. Построить уровни Ландау для электронов и дырок в арсениде галлия (легкие и тяжелые дырки считать невзаимодействующими). Построить зависимость ширины запрещенной зоны в HgCdTe от магнитного поля. Объяснить особенности плотности состояний в магнитном поле. К каким особенностям в спектре электрона в магнитном поле приводит учет спина. Объяснить природу возникновения осцилляций Шубникова-де Газа. Объяснить, почему не осциллирует коэффициент Холла. Условия наблюдения осцилляций Шубникова-де Газа. Определить по экспериментальным осцилляционным кривым концентрацию электронов и их эффективной массы. Объяснить природу магнитофононного резонанса (МФР). Как определяется эффективная масса в экспериментах по МФР. Построить зависимость концентрации электронов от магнитного поля в области примесной и собственной проводимости.

7. Формулировка общей квантово-механической задачи о спектре твердого тела. Основные приближения, позволяющие значительно упростить многочастичный гамильтониан. Эффекты, которые были потеряны при адиабатическом и одноэлектронном приближениях. Рассчитать спектр квантовой частицы в одномерном потенциальном ящике. Сделать оценки расстояния между энергетическими уровнями при разной степени заполнения ящика. Доказать теорему Блоха. Свести одномерное уравнение Шредингера к уравнению для блоховских множителей. Найти спектр первых трех зон в одномерном кристалле, найти эффективные массы закона дисперсия вблизи экстремум зон. Построить зависимость эффективной массы от энергии в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с содержанием кадмия 20%. Используя табличные параметры спектра, найти эффективные массы плотности состояний для электронов в Ge и Si. Построить изоэнергетические поверхности для легких и тяжелых дырок в валентной зоне Si, Ge и GaAs. Проследить эволюцию спектра валентной зоны при приложении одноосного давления вдоль главных кристаллографических направлений.

LMS-платформа – не предусмотрена

5.2. Описание внеаудиторных контрольно-оценочных мероприятий и средств текущего контроля по дисциплине модуля

Разноуровневое (дифференцированное) обучение.

Базовый

5.2.1. Контрольная работа №1

Примерный перечень тем

1. Спектр свободных и локализованных состояний.

Примерные задания

1. Найти энергию ионизации доноров в некомпенсированном примесном полупроводнике, если при увеличении температуры с 5 К до 20 К концентрация электронов увеличилась от $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.
2. Линия циклотронного резонанса на частоте 2.61 THz наблюдается в поле 1.8 Тл. Определить циклотронную эффективную массу.
3. Оценить энергию ионизации мелких донорных состояний в InSb и InAs.
4. Оценить энергию ионизации акцепторных состояний в InSb, учитывая сложный (наличие легких и тяжелых дырок) характер валентной зоны.
5. В исследуемом полупроводнике концентрация собственных электронов составляла $1.3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $T=400 \text{ К}$ и $6.2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $T=350 \text{ К}$. Найти ширину запрещенной зоны.

LMS-платформа – не предусмотрена

5.2.2. Контрольная работа № 2

Примерный перечень тем

1. Статистика полупроводников.

2. Явления переноса.

Примерные задания

1. Найти энергию Ферми в арсениде галлия при $T=4.2$ К, если известно, что концентрация электронов равна $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Ответить на вопрос: является электронный газ при этом вырожденным или он невырожденный?
2. Найти собственные концентрации электронов и дырок в антимониде индия при $T=300$ К. Наличием легких дырок в валентной зоне пренебречь.
3. Используя табличные параметры спектра, найти эффективную массу плотности состояний для электронов в Ge.
4. Найти условия, при которых в полупроводнике с концентрацией электронов $n=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и концентрацией дырок $p=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ коэффициент Холла в нулевом магнитном поле равен нулю.
5. Найти величину коэффициента Холла в сильном магнитном поле ($B \rightarrow \infty$) в полупроводнике p-типа, если известны концентрации легких и тяжелых дырок $p_1=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $p_2=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, соответственно.
6. Вдоль длинной стороны прямоугольной пластинки полупроводника с концентрацией электронов $1.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ пропускается ток силой 1 мА. Чему равна ЭДС Холла в магнитном поле 2.5 Тл? Размеры пластинки: длина 5 мм, ширина 1 мм, толщина 100 мкм?
7. Найти время релаксации импульса электронов в арсениде галлия, проводимость которого равна $2 (\text{Ом} \times \text{см})^{-1}$, коэффициент Холла, измеренный на этом кусочке равен $R_H = -1000 \text{ см}^3/\text{Кл}$

LMS-платформа – не предусмотрена

5.3. Описание контрольно-оценочных мероприятий промежуточного контроля по дисциплине модуля

5.3.1. Экзамен

Список примерных вопросов

1. Модель Латтинжера. Легкие и тяжелые дырки.
2. Простейшие модели спектра: одномерный ящик и модель Блоха. Предсказания моделей и их соответствие реальной ситуации.
3. Зависимость энергии Ферми от температуры в полупроводнике n-типа. Рассмотреть случаи нулевой и ненулевой компенсации.
4. Магнитофононный резонанс (МФР). Определение эффективной массы их экспериментаов по МФР.
5. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров.
6. Эффект Холла (один тип носителей, двигающихся с одинаковой скоростью, малые магнитные поля). Угол Холла. Характер движения электронов и дырок в скрещенных электрических и магнитных полях.
7. Ранние исследования и основные свойства полупроводников. Применение полупроводников.
8. Распределение Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Вырожденный и невырожденный электронный газ.

9. Характер движения электрона в периодическом потенциале при наличии внешнего электрического поля. Понятие групповой скорости. Эффективная масса.
10. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов при одновременном наличии донорной и акцепторной примеси. Считать $N_D > N_A$.
11. Тензор электропроводности, эффект Холла и магнитосопротивление в произвольном магнитном поле. Рассмотреть случаи вырожденного и невырожденного распределения носителей заряда, сильные и слабые магнитные поля.
12. Зонная структура полупроводников со структурой цинковой обманки. Бесщелевые и узкощелевые полупроводники. Спектр твердых растворов теллурида кадмия-ртути при различной концентрации ртути.
13. Магнитосопротивление для вырожденного и невырожденного полупроводника. Коэффициент магнитосопротивления, его зависимость от механизма рассеяния.
14. Зависимость времени релаксации импульса от энергии для различных механизмов рассеяния. Температурная зависимость подвижности.
15. Типы зонной структуры в кристаллических веществах. Зонная структура германия и кремния.
16. Эффект Холла и магнитосопротивление и их зависимости от магнитного поля для двух типов носителей заряда – электронов и дырок.
17. Энергетический спектр электронов и дырок в магнитном поле. Плотность состояний. Модификация спектра и плотности состояний при учете спина.
18. Элементы зонной теории. Формулировка общей квантово-механической задачи о нахождении электронного спектра. Адиабатическое приближение и его применимость. Одноэлектронное приближение.
19. Решение уравнения электронейтральности для собственного полупроводника. Температурная зависимость концентрации носителей заряда и уровня Ферми в собственном полупроводнике.
20. Зависимость ширины запрещенной зоны от магнитного поля. Обсудить возможные следствия с точки зрения измеряемых физических величин.
21. Классификация полупроводников. Методы выращивания полупроводников.
22. Электропроводность. Подвижность. Транспортное время релаксации импульса. Закон Ома в анизотропных полупроводниках.
23. Уравнение Больцмана. Правило усреднения времени релаксации импульса.
24. Эффект Холла для невырожденного и вырожденного электронного газа. Холл-фактор.
25. Межзонное и примесное магнитное вымораживание носителей.
26. Время релаксации и вероятность квантовых переходов. Рассеяние на ионизованной примеси. Температурная зависимость подвижности при рассеянии на ионизованной примеси.
27. Плотность состояний в изотропной и анизотропной зоне. Эффективная масса плотности состояний. Концентрация носителей заряда в зонах и на локальных уровнях. Интегралы Ферми.
28. Зонный характер спектра в модели Блоха. Волновая функция электрона в периодическом потенциале. Форма краев зон.
29. Модель Кейна.

30. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров.

31. Энергетический спектр реальных полупроводников. Классификация дефектов. Мелкие примесные уровни. Спектр и волновые функции мелких донорных и акцепторных состояний.

LMS-платформа – не предусмотрена

5.4 Содержание контрольно-оценочных мероприятий по направлениям воспитательной деятельности

Направления воспитательной деятельности сопрягаются со всеми результатами обучения компетенций по образовательной программе, их освоение обеспечивается содержанием всех дисциплин модулей.