

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан

А. Г. Коротаев

Оценочные материалы по дисциплине

Материалы и структуры функциональной электроники и фотоники

по направлению подготовки

03.04.03 Радиофизика

Направленность (профиль) подготовки:

Материалы и устройства функциональной электроники и фотоники

Форма обучения

Очная

Квалификация

Магистр

Год приема

2025

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

И.А. Прудаев

Председатель УМК

А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания в области физики, радиофизики и радиоэлектроники для решения научно-исследовательских задач, в том числе в сфере педагогической деятельности;

ОПК-3 Способен применять современные информационные технологии, использовать компьютерные сети и программные продукты для решения задач профессиональной деятельности.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 Представляет современную научную картину мира, выявляет естественнонаучную сущность проблемы, формулирует задачи в области радиофизики и радиоэлектроники и определяет пути их решения

ИОПК 3.1 Осуществляет поиск научно-технической информации с использованием информационных технологий

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

- тесты;
- контрольная работа;
- презентации на семинарах.

В ходе контроля проверяется достижение обучающимися следующих результатов обучения: ИОПК-1.1 (Представляет современную научную картину мира, выявляет естественнонаучную сущность проблемы, формулирует задачи в области радиофизики и радиоэлектроники и определяет пути их решения), ИОПК-3.1 (Осуществляет поиск научно-технической информации с использованием информационных технологий).

Примерный перечень вопросов для самостоятельной работы студентов (тестов)

1. Как зависит от ширины запрещённой зоны и температуры собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике?
2. На какие параметры полупроводниковых структур влияет ширина запрещённой зоны?
3. Что представляет собой гетеропереход?
4. Как с использованием решётки Бравэ построить конкретную кристаллическую структуру?
5. Какими элементами симметрии характеризуются кристаллы со структурой алмаза?
6. Запишите формулу для расчёта плотности кристалла ρ со структурой сфалерита.
7. Поясните природу ковалентной связи и назовите её основные свойства?
8. Назовите наиболее характерные свойства кристаллов с преобладающим типом:
а) ионной, б) ковалентной, в) металлической связи.
9. Назовите основные причины появления собственных точечных дефектов в кристалле полупроводника.
10. Что называется областью гомогенности полупроводникового соединения?
11. Какое влияние могут оказывать точечные дефекты на свойства полупроводника?
12. Назовите простейшие типы дислокаций в структуре алмаза.

13. Какое влияние может оказывать краевая дислокация на свойства полупроводниковой структуры?
14. Каковы основные причины появления дислокаций в полупроводниковых структурах?
15. Сформулируйте правило фаз Гиббса и поясните смысл каждого символа.
16. Сформулируйте правило рычага для двухкомпонентной системы AB .
17. Дайте определение коноды на фазовой диаграмме и поясните свойства коноды.
18. Какой состав двухкомпонентного сплава называется эвтектическим?
19. Назвать и охарактеризовать основные типы твердых растворов.
20. Дать определение степени компенсации.
21. Каскадный механизм захвата носителей заряда на глубокие уровни.
22. Основные области применения компенсированных материалов в полупроводниковой электронике.
23. Основные механизмы переноса носителей заряда с участием глубоких центров (перколяция, прыжковый транспорт, генерационно-рекомбинационные токи).
24. Преимущества и недостатки использования компенсированных материалов в качестве активной области детекторов ионизирующих излучений.
25. Преимущества и недостатки использования компенсированных материалов в качестве активной области импульсных лавинных коммутаторов (биполярных транзисторов, обострительных диодов и фотопроводящих ключей).
26. Пояснить принцип действия газового сенсора на основе поликристаллической пленки оксида металла.
27. Модели проводимости в поликристаллических пленках.
28. Мостиковая и барьерная модель проводимости.
29. При каком условии наблюдается переход от барьерной к прыжковой модели проводимости в поликристаллических пленках?
30. Описать физические процессы нелинейно-оптического преобразования, протекающие при генерации второй гармоники.
31. В чем заключается условие согласования фаз?
32. Волна поляризации: условия её появления.
33. Перечислить наиболее значимые прикладные области использования широкозонных материалов.
34. Преимущества широкозонных нитридов по сравнению с системой растворов $AlGaInAs$ в области разработки силовой и сверхвысокочастотной электроники.
35. Преимущества широкозонных оксидов $(AlGaIn)_2O_3$ по сравнению с системой растворов $AlGaInN$ в области разработки силовой электроники.
36. Технологические особенности изготовления гетероструктур и легирования широкозонных материалов.
37. Указать диапазоны длин волн светоизлучающих диодов, для которых используются системы растворов $AlGaInAs$, $AlGaInP$ и $AlGaInN$.

Примеры задач:

1. Рассчитать (в см^{-3}) собственную концентрацию носителей заряда в полупроводнике при температуре $T = 300 \text{ К}$. Ширина запрещённой зоны полупроводника $E_g = 1,424 \text{ эВ}$, эффективная масса электронов $m_n^* = 0,067 m_0$. Валентная зона содержит две подзоны:

эффективная масса лёгких дырок $m_{pl}^* = 0,087 m_0$, эффективная масса тяжёлых дырок $m_{ph}^* = 0,62 m_0$. Рассчитать положение уровня Ферми (в электрон-вольтах – относительно дна зоны проводимости) в собственном полупроводнике при этой температуре.

2. Рассчитать (в г/см^3) плотность кристалла GaP, относящегося к структурному типу сфалерита (тип B3), если тетраэдрические ковалентные радиусы атомов галлия и фосфора равны: $r_{\text{Ga}} = 0,126 \text{ нм}$ и $r_{\text{P}} = 0,110 \text{ нм}$. (Тетраэдрический ковалентный радиус – это радиус атома в структуре с ковалентным типом связи и координационным числом 4).

3. Энтальпия образования одиночной вакансии в кристалле Ge (структурный тип алмаза) $\Delta H_v = 1,9 \text{ эВ}$. Рассчитать (в см^{-3}) равновесную концентрацию вакансий в Ge при температуре 935°C . Тетраэдрический ковалентный радиус атома германия $r_{\text{Ge}}^T = 0,1225 \text{ нм}$.

4. Рассмотреть процесс охлаждения расплава, состоящего из $68,671 \text{ г Au}$ и $6,329 \text{ г Ge}$: определить температуры фазовых превращений, изменения составов сосуществующих фаз, качественно изобразить кривую охлаждения системы, записать для каждого участка кривой охлаждения правило фаз Гиббса. Для равновесных составов при 362°C рассчитать количество атомов в каждой фазе.

Примерные темы семинарских занятий:

1. Материалы с глубокими уровнями в СВЧ электронике (подробная характеристика подложечных материалов для транзисторов с высокой подвижностью или горячими носителями (HEMT и HET), адсорбционных электрооптических модуляторов и т.д).

2. Импульсная коммутация электрической мощности (способы коммутации; твердотельные и газовые коммутаторы; разрядники, тиристоры, MOSFET и IGBT-транзисторы, обострители, размыкатели тока, SOS-диоды: примеры использования компенсированных материалов).

3. Применение детекторов ионизирующего излучения в технике (медицина, экспериментальная физика, дефектоскопия, аналитическое оборудование; основные характеристики: доза, пространственное и спектральное разрешение, используемые энергии, методы регистрации и т.д).

4. Гетероструктуры для светодиодов на основе широкозонных твёрдых растворов (применение и свойства).

5. Конструкции и применение структур на основе GaN и AlGaN в СВЧ электронике (HEMT, HET, RTD).

6. Структуры на основе поликристаллических оксидов для газовых сенсоров (принцип работы, свойства, применение).

7. Нелинейные кристаллы: общая характеристика (вектор поляризации, квадратичная и кубическая поляризация, условие согласования фаз, генерация гармоник второго и третьего порядков). Свойства нелинейно-оптических кристаллов и их применение (GaSe, CdSiP₂).

8. Оксиды Ga, Al и In: свойства, приборы, применение.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

В ходе контроля проверяется достижение обучающимися следующих результатов обучения: ИОПК-1.1 (Представляет современную научную картину мира, выявляет естественнонаучную сущность проблемы, формулирует задачи в области радиофизики и радиоэлектроники и определяет пути их решения), ИОПК-3.1 (Осуществляет поиск научно-технической информации с использованием информационных технологий).

Примерный перечень теоретических вопросов:

1. Типы химических связей в твердых телах. Основные принципы кристаллохимической классификации материалов.
2. Структура кристаллов. Характеристика структурных типов алмаза, сфалерита и вюрцита. Симметрия и анизотропия физических и физико-химических свойств кристаллов данных структурных типов.
3. Точечные дефекты в кристаллах полупроводников. Типы, механизмы образования точечных дефектов в элементарных полупроводниках и полупроводниковых соединениях, влияние точечных дефектов на электрофизические, оптические и другие свойства полупроводника.
4. Краевая и винтовая дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Основные свойства дислокаций. Простые дислокации в структурах алмаза и сфалерита. Влияние дислокаций на электрофизические, оптические и другие свойства полупроводника.
5. Глубокие уровни в полупроводниках. Компенсированные полупроводники, степень компенсации и положение уровня Ферми. Использование компенсированных полупроводников.
6. Твердые растворы полупроводниковых соединений (нитриды, фосфиды и оксиды галлия). Зависимости основных свойств тройных и четырехкомпонентных твердых растворов от состава. Использование твердых растворов в электронике и оптоэлектронике.
7. Генерация электромагнитного поля волной поляризации. Условие согласования фаз. Генерация гармоник второго и третьего порядков. Применение нелинейно-оптических кристаллов для генерации терагерцового излучения.
8. Поликристалл и его энергетическая диаграмма, электронная проводимость поликристаллов, уровень протекания.
9. Структуры для сенсоров газа на основе поликристаллических полупроводников. Модели проводимости.
10. Использование компенсированного арсенида галлия в электронике: приборы, их назначение и принцип действия.
11. Излучающие приборы оптического диапазона и СВЧ приборы на основе широкозонных полупроводников: принцип действия и основные преимущества.

Студент, не аттестованный в контрольной точке, не допускается к сдаче экзамена. Результаты экзамена определяются оценками согласно таблице.

Компетенция	Индикатор компетенции	Критерии оценивания результатов обучения			
		Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания в области физики, радиофизики и радиоэлектроники для решения научно-исследовательских задач, в том числе в сфере педагогической деятельности;.	ИОПК 1.1 Представляет современную научную картину мира, выявляет естественнонаучную сущность проблемы, формулирует задачи в области радиофизики и радиоэлектроники и определяет пути их решения	Не имеет представления о физических принципах работы полупроводниковых приборов	Имеет общее представление о принципах работы полупроводниковых приборах и способах их изготовления	Описывает физические принципы работы полупроводниковых приборов и технологические методы их изготовления	Уверенно и детально описывает методы получения полупроводниковых структур, используемых в электронике; демонстрирует отличные знания принципов работы полупроводниковых приборов
ОПК-3 Способен применять современные информационные технологии, использовать компьютерные сети и программные продукты для решения задач профессиональной деятельности.	ИОПК 3.1 Осуществляет поиск научно-технической информации с использованием информационных технологий	Не имеет представления об инструментах поиска научно-технической информации	Имеет общие представления об инструментах поиска научно-технической информации	Демонстрирует знания методов и инструментов поиска научно-технической информации с использованием информационных технологий	Успешно проводит поиск научно-технической информации с использованием информационных технологий.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Вопросы теста для оценки остаточных знаний по дисциплине
(верные ответы выделены курсивом)

№	Вопрос	Варианты ответа
1	Кристалл GaAs относится к структурному типу:	а) алмаза. б) <i>сфалерита</i> . в) халькопирита. г) вюрцита. д) CsCl.
2	Радиус r атома в кристалле со структурой алмаза связан с периодом решётки кристалла a соотношением:	а) $r = \frac{a\sqrt{2}}{2}$. б) $r = \frac{a\sqrt{3}}{4}$. в) $r = \frac{a\sqrt{3}}{8}$. г) $r = \frac{a}{2}$.
3	К точечным структурным дефектам в кристаллах относятся (один или несколько ответов):	а) <i>вакансии</i> . б) дефекты упаковки. в) <i>межузельные атомы</i> . г) микродвойники. д) <i>антиструктурные дефекты</i> . е) дислокации. ж) <i>атомы примеси</i> .
4	Вектор Бюргерса краевой дислокации образует с осью этой дислокации угол, равный:	а) 0° . б) 45° . в) 60° . г) 90° .
5	Ориентация выращиваемого кристалла в методе Чохральского определяется:	а) частотой вращения затравки б) <i>ориентацией затравки</i> в) степенью переохлаждения расплава
6	Эпитаксия – это...	а) добавление в состав материалов примесей для изменения их свойств б) процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого в) <i>ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого</i>
7	Где располагается уровень Ферми при равных концентрациях акцепторной и донорной примесей в полупроводнике?	а) Вблизи середины запрещенной зоны. б) В запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны. г) В запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости. д) В зоне проводимости. е) <i>В середине энергетического зазора $E_d - E_a$ (где E_d и E_a – уровни донорной и</i>

		<i>акцепторной примесей).</i>
8	Какой параметр полупроводников увеличивается при увеличении ширины запрещенной зоны?	а) Эффективная масса дырок. б) Эффективная масса дырок и электронов. в) Температура плавления. д) Коэффициент теплопроводности. е) Концентрация собственных носителей заряда.
9	В каком случае происходит генерация второй гармоники?	а) При падении излучения на кристалл с нелинейно-оптическими свойствами. б) При нормальном падении излучения на кристалл с нелинейно-оптическими свойствами. в) При генерации излучения в кристалле с нелинейно-оптическими свойствами. г) При падении излучения на кристалл с нелинейно-оптическими свойствами при условии выполнения фазового синхронизма. е) В случае, когда невозможна генерация третьей гармоники.
10	Какова порядковая оценка для энергий квантовых уровней?	а) $E_n \sim h^2/ma^4$ б) $E_n \sim ma^2$ в) $E_n \sim h^2/ma^2$ г) $E_n \sim 1/ma^2$
11	Одним из условий наблюдения квантоворазмерных эффектов является выполнение неравенства:	а) $E_{n+1} - E_n \gg kT$ б) $E_{n+1} - E_n \gg kT^2$ в) $E_{n+1} - E_n \gg \ln(kT)$ г) $E_{n+1} - E_n \gg \exp(kT)$
12	Каково соотношение эффективных масс электронов (m_e) и дырок (m_h) в узкозонных твердых растворах КРТ?	а) $m_e \gg m_h$ б) $m_e = m_h$ в) $m_e \ll m_h$
13	Фотонные детекторы характеризуются:	а) узким диапазоном фоточувствительности б) широким диапазоном фоточувствительности в) высокой обнаружительной способностью г) низкой обнаружительной способностью
14	В основе работы органических излучательных светодиодов лежит:	а) триболоминесценция б) фотолюминесценция в) электролюминесценция г) катодолуминесценция
15	Типичные значения подвижности носителей заряда (μ , $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$) в органических полупроводниках лежат в следующих пределах:	а) $10^{-7} \div 1$ б) $10 \div 100$ в) $100 \div 10^4$ г) более 10^4

Информация о разработчиках

Гермогенов Валерий Петрович, доктор физико-математических наук, Томский государственный университет, профессор.

Прудаев Илья Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Томский государственный университет, доцент.