

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева» (РХТУ им. Д.И. Менделеева)

**Программа вступительных испытаний в магистратуру
по направлению**

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

магистерская программа:

«Материаловедение для фотоники и электроники»

Разработчики программы:

- заведующий кафедрой химии и технологии кристаллов, д.х.н., проф. И. Х. Аветисов
- профессор кафедры химии и технологии кристаллов, д.х.н., проф. О. Б. Петрова

1. Введение

Программа вступительных испытаний предназначена для лиц, желающих поступить в магистратуру ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева» по направлению подготовки 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов (магистерская программа: «Материаловедение для фотоники и электроники»). Программа разработана в соответствии с Порядком организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, утвержденным приказом Министерства образования и науки РФ от 6 апреля 2021 года № 245. Программа рекомендуется для подготовки к вступительным испытаниям выпускников бакалавриата и специалитета классических университетов, технических и технологических вузов. Содержание программы базируется на следующих учебных дисциплинах: «Общая и неорганическая химия», «Физическая химия», «Коллоидная химия», «Процессы и аппараты химической технологии», «Общая химическая технология», «Физическая химия материалов фотоники и электроники», «Физика конденсированного состояния», «Введение в физические принципы квантовой электроники и фотоники», «Современные методы исследования материалов для фотоники и электроники», «Нано- и микромасштабная химическая дифференциация атомов в стеклах», «Применения материалов с разной степенью упорядоченности в фотонике и электронике», «Нелинейнооптические среды в фотонике», «Лазерное микро и наномодифицирование структуры прозрачных диэлектриков» и других специальных учебных дисциплинах, преподаваемых в РХТУ им. Д.И. Менделеева в рамках направления подготовки 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов.

2. Содержание программы

1. Физическая химия материалов электроники и фотоники

1.1. Кристаллография.

1.1.1. Понятие элементарной ячейки.

1.1.2. Операции симметрии.

1.1.3. Сингонии и пространственные группы.

1.2. Кристаллооптика.

1.2.1. Показатель преломления кристаллов и стекол

- 1.2.2. Анизотропия показателя преломления.
- 1.2.3. Двойное лучепреломление.
- 1.2.4. Поверхность показателей преломления.
- 1.2.5. Дисперсия показателей преломления.
- 1.2.6. Оптическая индикатриса.
- 1.3. Тепловой беспорядок в кристалле. Тепловые дефекты.
 - 1.3.1. Концентрация дефектов как функция температуры в однокомпонентных кристаллах.
 - 1.3.2. Зависимость концентрации тепловых дефектов от температуры в двухкомпонентных кристаллических соединениях.
- 1.4. Беспорядок в кристалле, обусловленный нарушениями стехиометрии.
 - 1.4.1. Неизбежность нарушения стехиометрии в кристаллах химических соединений.
 - 1.4.2. Нестехиометрия бинарных соединений.
 - 1.4.3. Влияние дефектов нестехиометрии на свойства кристаллов.
 - 1.4.4. Зависимость концентрации дефектов нестехиометрии от давления и температуры.
 - 1.4.5. Отображение нестехиометрии на Т-Х диаграмме.
 - 1.4.5. Собственные примеси в особо чистом кристалле стехиометрического состава.
- 1.5. Беспорядок в кристалле, обусловленный посторонними примесями.
 - 1.5.1. Неизбежность загрязнения кристалла посторонними примесями.
 - 1.5.2. Равновесие дефектов в элементарном кристалле, обусловленных посторонними примесями.
 - 1.5.3. Растворы внедрения.
 - 1.5.4. Изовалентное и гетеровалентное замещение.
- 2. Физические принципы квантовой электроники и фотоники**
 - 2.1. Элементы зонной теории твердых тел
 - 2.1.1. Зонные схемы проводников, полупроводников и диэлектриков.
 - 2.1.2. Статистика равновесных носителей тока.
 - 2.1.3. Уровень Ферми.
 - 2.1.4. Концентрация носителей тока в собственном полупроводнике.
 - 2.1.5. Примесные уровни в кристалле.
 - 2.1.6. Зависимость положения уровня Ферми от концентрации приме-сей и от температуры.
 - 2.1.7. Неравновесные носители заряда в полупроводнике.
 - 2.1.8. Подвижность. Диффузия и дрейф.
 - 2.2. Электрические переходы.
 - 2.2.1. Образование р-п перехода.
 - 2.2.2. Свойства р-п перехода, прямой и обратный токи р-п перехода. механизмы пробоя р-п перехода: лавинный, туннельный,

- тепловой. Вольтамперная характеристика.
- 2.2.3. Изотипные и анизотипные гетеропереходы.
- 2.3.4. Методы создания p-n перехода.
- 2.3.5. Омические и выпрямляющие контакты.
- 2.3. Полупроводниковые приборы
 - 2.3.1. Без p-n перехода (резисторы, фоторезисторы, терморезисторы, простейшие датчики Холла, варисторы).
 - 2.3.2. С 1 p-n переходом (диоды, фотодиоды, туннельные диоды, варикапы, стабилитроны, светодиоды, светодиоды с гетеропереходами, солнечные элементы).
 - 2.3.3. С 2 p-n переходами (биполярные транзисторы, полевые транзисторы, фототранзисторы).
 - 2.3.4. С 3 p-n переходами (тиристоры, фототиристоры).
 - 2.3.5. С большим числом p-n переходов (ПЗС-матрицы, интегральные схемы (классификация, пределы интеграции), элементы Пельтье).
- 2.4. Электронные явления, обусловленные связанными электронами.
 - 2.4.1. Диэлектрические материалы: сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, позисторные материалы, пироэлектрики
 - 2.4.2. Магнитные материалы: ферромагнетики, ферримагнетики, антиферромагнетики
 - 2.4.3. Сверхпроводники: образование куперовских пар, ВТСП, взаимодействие сверхпроводников I и II типа с магнитным полем
- 2.5. Электронные процессы в газах
 - 2.5.1. Виды электронной эмиссии
 - 2.5.2. Электрические разряды в газах.
 - 2.5.3. Газоразрядные и люминесцентные лампы.
- 2.6. СВЧ техника
 - 2.6.1. Особенности СВЧ-диапазона.
 - 2.6.2. Коаксиальный и объёмный резонаторы
 - 2.6.3. Согласованная нагрузка.
 - 2.6.4. Волновод.
 - 2.6.5. Клистрон.
 - 2.6.6. Лампа бегущей волны.
 - 2.6.7. Лампа обратной волны.
 - 2.6.8. Магнетрон.
- 2.7. Люминесценция
 - 2.7.1. Механизмы люминесценции.
 - 2.7.2. Механизмы передачи возбуждения.
 - 2.7.3. Модели излучательной рекомбинации.
 - 2.7.4. Кинетика люминесценции.
- 2.8. Лазеры

- 2.8.1. Спонтанные и вынужденные переходы.
- 2.8.2. Инверсная заселенность.
- 2.8.3. Классификация лазеров.
- 2.8.4. Твердотельные лазеры (на переходных активаторах, на РЗЭ активаторах, на центрах окраски, полупроводниковые лазеры).
- 2.8.5. Лазеры на красителях.
- 2.8.6. Газовые лазеры.
- 2.8.7. Применение лазеров.
- 2.9. Современная электроника и оптоэлектроника.
 - 2.9.1. Волоконный световод.
 - 2.9.2. Многослойные диэлектрические зеркала и полупрозрачные материалы.
 - 2.9.3. Фотоника, оптоэлектроника.
 - 2.9.4. Нанoeлектроника
 - 2.9.5. Спинтроника.

3. Технология кристаллических материалов для фотоники и электроники

- 3.1. Термодинамика кристаллизации.
 - 3.1.1. Равновесная кристаллизация Гиббса и равновесный кристалл Кюри.
 - 3.1.2. Пирамиды, секторы и слои роста.
 - 3.1.3. Ростовые формы.
 - 3.1.4. Потенциальный барьер и критический размер кристаллического зародыша.
 - 3.1.5. Кристаллизационная сила и давление.
 - 3.1.6. Гомогенное зародышеобразование.
 - 3.1.7. “Атомарная” шероховатость граней.
- 3.2. Атомарноструктурные модели и механизмы роста.
 - 3.2.1. Ретикулярная плотность и огранка кристаллов (принцип Бравэ).
 - 3.2.3. Механизмы роста атомарногладких и атомарношероховатых граней; нормальный и послонный рост кристаллов.
 - 3.2.4. Дислокационный механизм роста кристаллов.
- 3.3. Макродинамика кристаллизации.
 - 3.3.1. Коэффициент распределения примесей при росте кристалла.
 - 3.3.2. Концентрационное переохлаждение и морфологическая устойчивость плоского фронта кристаллизации.
 - 3.3.3. Ячеистый рост.
 - 3.3.4. Дендритный рост.
 - 3.3.5. Тепло- и массообмен при росте кристаллов.
- 3.4. Неравновесная кристаллизация и факторы роста.
 - 3.4.1. Кинетика кристаллизации; скорость зародышеобразования; линейная и объёмная скорости роста.
 - 3.4.2. Явление геометрического отбора граней и кристаллов.

- 3.5. Выращивание кристаллов из расплавов.
 - 3.5.1. Теплообмен между кристаллом и расплавом.
 - 3.5.2. Стабильность плоского фронта кристаллизации.
 - 3.5.3. Выращивание монокристаллов направленной кристаллизацией; влияние кривизны фронта кристаллизации на поперечное распределение примесей в кристалле; эффект грани.
 - 3.5.4. Метод Бриджмена и его модификации.
 - 3.5.5. Метод Чохральского и его разновидности.
 - 3.5.6. Метод Киропулоса.
 - 3.5.7. Выращивание профилированных монокристаллов методом Степанова.
 - 3.5.8. Выращивание монокристаллов в “холодном” контейнере.
 - 3.5.9. Зонная плавка.
 - 3.5.10. Выращивание монокристаллов методом Вернейля.
- 3.6. Выращивание кристаллов из растворов.
 - 3.6.1. Метод испарения растворителя.
 - 3.6.2. Метод понижения температуры.
 - 3.6.3. Метод температурного перепада.
 - 3.6.4. Выращивание монокристаллов в растворе-расплаве;
 - 3.6.5. Выращивание в гидротермальных растворах;
- 4. Методы исследования и характеристики материалов электроники**
 - 4.1. Термические методы анализа.
 - 4.1.1. Термический и дифференциально-термический методы анализа.
 - 4.1.2. Термогравиметрический и дифференциально-термогравиметрический методы анализа.
 - 4.1.3. Оборудование для термографии. Требования к эталонам.
 - 4.1.4. Термогазоволюмометрический анализ.
 - 4.1.5. Термоэлектрометрический анализ.
 - 4.2. Методы исследования структуры материалов.
 - 4.2.1. Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ.
 - 4.2.2. Индицирование дифрактограмм.
 - 4.2.3. Закон Веганда
 - 4.3. Оптическая спектроскопия.
 - 4.3.1. Спектры поглощения и пропускания.
 - 4.3.2. Диапазон прозрачности материала.
 - 4.3.3. Спектрофотометры, спектрофлюориметры.
 - 4.4. Элементный анализ.
 - 4.4.1. Электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ.
 - 4.4.3. Эмиссионный микроспектральный анализ с лазерным отбором пробы.
 - 4.5. Электронная микроскопия.
 - 4.5.1. Просвечивающая электронная микроскопия.
 - 4.5.2. Сканирующая (растровая) электронная микроскопия.

3. Примерные вопросы для подготовки к вступительному испытанию

Блок 1. Общие вопросы по профилю

1. Связь симметрии кристаллов и анизотропии их оптических, механических и электрических свойств. Атомные и ионные радиусы.
2. Кристаллооптические методы анализа монокристаллов. Методы определения показателей преломления для изотропных и анизотропных кристаллов, для стекол.
3. Понятие координационного числа в кристаллической решетке. Типы плотнейших упаковок кристаллов. Взаимосвязь между величиной ионного радиуса и координационным числом.
4. Классификация кристаллографических групп симметрии. Точечные группы симметрии. Принцип Кюри.
5. Дефекты реального кристалла. Собственные и примесные дефекты в элементарном кристалле; точечные и протяженные дефекты. Концентрация термодинамических дефектов как функция температуры в однокомпонентных кристаллах
6. Понятие нестехиометрии. Классификация нестехиометрических фаз. Отображение нестехиометрии бинарной фазы на Р-Т-х диаграмме.
7. Правило фаз Гиббса. Отображение фазовых равновесий на Р-Т-х диаграмме. Особенности отображения бинарных нестехиометрических фаз на Т-х проекции и Т-х сечении.
8. Основные типы гетерофазных реакций (эвтектические, перитектические, синтектические). Отображение равновесий гетерофазных реакций на Т-Х проекциях.
9. Принцип построения основных оптических поверхностей для кристаллов различных сингоний. Преломление света в кристаллах и стеклах, показатели преломления. Сила двойного лучепреломления. Оптический знак кристалла.
10. Виды электронной эмиссии. Классификация газовых разрядов по давлению и характеристикам электромагнитного поля. Принцип работы ФЭУ.
11. Основы рентгеновской дифракции. Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ. Индексирование рентгеновских дифрактограмм. Закон Вегарда.
12. Люминесценция. Определение, отличие от других видов свечения. Классификация люминесценции по методу возбуждения. Механизмы люминесценции. Кинетика люминесценции.

13. Энергетические зонные диаграммы металлов, диэлектриков и полупроводников. Объяснение проводимости материалов с точки зрения зонной теории. Различия в характеристиках между диэлектриками и полупроводниками. Собственные и примесные полупроводники.
14. Полупроводниковые приборы с одним $p-n$ переходом. Диоды, фотодиоды, солнечные элементы, светодиоды с гетеропереходами. Области применения каждого из перечисленных полупроводниковых устройств.
15. Полупроводниковые приборы без $p-n$ переходов. Термо- и тензорезисторы, фоторезисторы, датчики Холла, диоды Ганна. Области применения.
16. Полупроводниковые приборы с двумя $p-n$ переходами. Биполярные и полевые транзисторы. Полевые транзисторы с встроенным и индуцированным каналом.
17. Преломление и отражение света. Явление Брюстера. Коэффициент отражения и пропускания. Полное внутреннее отражение. Оптические волноводы. Виды световодов. Волоконная связь.
18. Явление фотопроводимости. Механизмы поглощения света и их взаимосвязь с фотопроводимостью. Типы экситонов. Их роль в явлениях фотопроводимости и люминесценции.
19. Явление сверхпроводимости. Эффект Джозефсона. Эффект Мейснера. Сверхпроводники I и II рода. Высокотемпературные сверхпроводники. Устойчивость сверхпроводящего состояния к внешним электромагнитным воздействиям.
20. Термические методы исследования фазовых равновесий и фундаментальных характеристик твердых тел: варианты термического анализа (ДТА, ДТГ, ДСК, дилатометрия, термо- Э.Д.С.).
21. Классификация диэлектриков. Поляризация диэлектриков. Взаимосвязь между кристаллографическими особенностями материала и диэлектрическими свойствами. Сегнетоэлектрики. Пьезоэлектрики. Пироэлектрики.
22. Лазерное излучение: основные характеристики. Физические основы работы лазера. Твердотельные лазеры. Модуляция добротности лазера.
23. Магнитные свойства вещества. Ферромагнетики, ферримагнетики, диамагнетики. Магнитомягкие и магнитотвердые вещества. Магнитная жидкость.

Блок 2. Вопросы по технологии по профилю

1. Методы выращивания кристаллов из раствора. Зависимость растворимости от температуры, выбор метода кристаллизации.
2. Методы выращивания кристаллов из расплава. Способы нагрева. Выбор тигельного материала. Дефекты кристаллов, присущие расплавному методам роста. Технология выращивания кристаллов сапфира методом Киропулоса.
3. Механизмы роста кристаллов. Послойный и нормальный рост кристаллов. Распределение примесей при росте кристаллов методами направленной кристаллизации. Очистка материалов методом направленной кристаллизации.
4. Классификация методов роста кристаллов (по типу фазовых переходов; по характеру движущей силы). Технология выращивания кристаллов кремния методом Чохральского.
5. Теплообмен между кристаллом и расплавом. Стабильность плоского фронта кристаллизации. Метод Бриджмена. Характерные дефекты кристаллов, выращенных методом Бриджмена.
6. Метод Чохральского и его вариации для выращивания кристаллов различных материалов. Характерные дефекты кристаллов, выращенных методом Чохральского.
7. Выращивание кристаллов методом Вернейля. Характерные дефекты кристаллов, выращенных методом Вернейля.
8. Пересыщение и переохлаждение и их роль в процессах выращивания кристаллов. Способы создания пересыщения. Метастабильное, стабильное и лабильное состояния термодинамической системы.
9. Вакуумные термические методы напыления пленок бинарных соединений: классификация, достоинства и недостатки.
10. Ионные методы формирования тонких пленок: классификация, достоинства и недостатки. Мишени для магнетронного распыления. Технология магнетронного напыления пленок соединений A^2B^6 .
11. Классификация методов формирования тонких пленок. Конструктивные особенности вакуумных термических методов напыления пленок. Выбор материалов испарителей.
12. Понятие цвета. Понятие локуса. Реальные и нереальные цвета. Цветовые палитры. Законы Грассмана. Определение координат цветности в цветовом пространстве МКО (C.I.E.)
13. Химические методы получения тонких пленок. Метод атомно-послойного осаждения. Область применения метода АПО (ALD). Основные материалы для получения пленок методом ALD. Базовые характеристики получаемых пленок.

14. Технология монокристаллических подложек для процессов эпитаксии. Ориентированная резка. Шлифовка, Полировка. Характеристики монокристаллических пластин для проведения процессов эпитаксии.

4. Рекомендованная литература

1. Шаскольская М.П. Кристаллография. М., Высшая школа, 1984.
2. Егоров-Тисменко Ю.К. Кристаллография и кристаллохимия. М.: КДУ, 2010, 588 с.
3. Урусов В.С., Еремин Н.Н. Кристаллохимия. Краткий курс. Изд. МГУ, 2010, 256 с.
4. Глазов В.М., Павлова Л.М. Химическая термодинамика и фазовые равновесия. М.: Металлургия, 1988, 560 с.
5. Третьяков Ю.Д., Лепис Х. Химия и технология твердофазных материалов. Изд. МГУ, 1985, 256 с.
6. Майер А.А. Физическая химия твердого тела: Кристаллооптика, М.:МХТИ, 1984.
7. Ковтуненко П.В. Физическая химия твердого тела. Кристаллы с дефектами. М. Высшая школа, 1993, 352 с.
8. Зломанов В. П., Аветисов И. Х., Можевитина Е. Н. Физическая химия твердого тела. Р–Т–х диаграммы фазовых равновесий: учеб. пособие. – М.: РХТУ, 2019. 184 с.
9. Зломанов В.П. Фазовые равновесия. Химия дефектов в кристалле. Учебное пособие. – М.: МГУ, 2011, 114 с.
10. Барканов А.Д., Аветисов Р.И., Хомяков А.В., Аветисов И.Х., Степанова И.В. Технология вакуумных производств. Вакуумное оборудование. М.: РХТУ, 2022. 96 с.
11. Майер А.А. Процессы роста кристаллов, М.:РХТУ, 1999, 176 с.
12. Багдасаров Х.С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава, М.:Физматлит, 2004, 160 с.
13. Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А. Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией. М.: Физматлит, 2006, 224 с.
14. Почиталкина И. А., Морозов А. Н., Петрова О. Б. Теоретические основы процесса кристаллизации в водных растворах и их практическое применение в технологии неорганических веществ. — М.: РХТУ, 2022. — 64 с.
15. Рунина К. И., Петрова О. Б., Хомяков А. В. Люминесцентная спектроскопия. — РХТУ им. Д. И. Менделеева Москва, 2024. — 136 с.
16. Терехов В.А. Задачник по электронным приборам: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2003. – 276 с.
17. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 456 с, ил.
18. Петрова О. Б., Степанова И. В. Физическая электроника и электронные приборы. Лабораторный практикум и пособие по решению задач: учеб.

- пособие . – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2020. – 152 с.
19. Василенко О.А. Оптические явления в твердом теле: конспект лекций: Учеб. пособие М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. – 136 с.
 20. Курс лекций «Кристаллография». 09.02.2024 [электронный ресурс] — Режим доступа: <http://cryst.geol.msu.ru/courses/crgraf/>
 21. Матт Янг. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 541 с., ил.
 22. Основы оптоэлектроники. Под ред. К.М.Галанта. М: Мир, 1988, 288 с.
 23. Ландсберг Г. С. Оптика: Учеб. пособие для вузов. изд. 6-е – М. : Физмат- лит, 2010. – 848 с.
 24. Белозеров В. В. Современные методы диагностики материалов и изделий из них. Белозеров В.В., Босый С.И., Буйло С.И., Прус Ю.В. – Ростов н/Д : ЮФУ, 2007. – 224 с.
 25. Павличенко, Л.А. Термический анализ двухкомпонентных систем [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Л.А. Павличенко, Г.В. Булидорова, Ю.Г. Галяметдинов. — Электрон. дан. — Казань : КНИТУ, 2013. — 104 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/73440> — Загл. с экрана
 26. Васильев Е.К. Качественный рентгенофазовый анализ / под ред. С. Б. Брандта. – Новосибирск: Наука, 1986. – 195 с.
 27. Методы исследования материалов электронной техники и наноматериалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие / Н. Г. Горащенко, О. Б. Петрова, И. В. Степанова. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 94 с.
 28. Степанова И.В., Зыкова М.П., Волошин А.Э., Аветисов И.Х., Синхротронные, нейтронные и рентгеновские методы диагностики структуры функциональных материалов: в 2 ч. Часть 1. Рентгеновские методы. М.: РХТУ, 2022. 120 с.
 29. Нелинейная оптика. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : конспект лекций / В. В. Слабко, А. В. Закарлюка, Н. Э. Лямкина. – Электрон. дан. (2 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Нелинейная оптика : УМКД № 94-2007 / рук. творч. коллектива В. В. Слабко). – 1 электрон. опт. диск (DVD)
 30. Беспрозванных, В.Г. Нелинейная оптика: учеб. пособие / В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 200 с. ISBN 978-5-398-00574-5