

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета РТЭ _____ Небольсин В.А.
«27» марта 2024 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины

«Физико-химические основы технологии материалов и структур
физической электроники»

Направление подготовки 16.03.01 Техническая физика

Профиль Физическая электроника

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2024

Автор программы _____ Бабкина И.В.

Заведующий кафедрой
Твердотельной электроники _____ Небольсин В.А.

Руководитель ОПОП _____ Янченко Л.И.

Воронеж 2024

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины Получение углубленного профессионального образования по технологии электронной компонентной базы, позволяющего выпускнику обладать предметно-специализированными компетенциями, способствующими востребованности на рынке труда, обеспечивающего возможность быстрого и самостоятельного приобретения новых знаний, необходимых для адаптации и успешной профессиональной деятельности в области микро- и нанoeлектроники.

1.2. Задачи освоения дисциплины

- Изучить этапы развития и современное состояние технологии материалов и приборов макро-, микро- и нанoeлектроники, основные процессы технологии производства компонентной базы электроники.

- Познакомиться с общими принципами термодинамического анализа и управления фазовыми и химическими равновесиями в технологических процессах электроники.

- Изучить применяемые на практике методы управления диффузионными и тепловыми явлениями в технологических процессах электроники. Изучить физико-химические основы выращивания монокристаллов, формирования эпитаксиальных слоев и легированных приборных структур твердотельной электроники.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Физико-химические основы технологии материалов и структур физической электроники» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений блока Б1.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Физико-химические основы технологии материалов и структур физической электроники» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-6 - Способность осуществлять разработку и контроль технологических процессов изготовления материалов, узлов и устройств микроэлектроники и квантовой электроники на базе нанотехнологий.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-6	Знать основные процессы в гетерогенных химико-технологических системах; процессы разделения, очистки и легирования материалов электронной техники, кристаллизацию и стеклование; инструментальное оформление и организацию физико-технических технологических процессов;
	Уметь выполнять расчет основных параметров

	материалов и технологических параметров их изготовления; использовать технические средства для определения основных параметров технологического процесса; обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов;
	Владеть навыками расчета технологических процессов с применением пакетов прикладных программ; навыками использования технических средств для определения основных параметров технологического процесса; способностью выбора технологического процесса производства материалов электронной техники.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Физико-химические основы технологии материалов и структур физической электроники» составляет 10 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий
очная форма обучения

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры	
		4	5
Аудиторные занятия (всего)	180	90	90
В том числе:			
Лекции	72	36	36
Практические занятия (ПЗ)	72	36	36
Лабораторные работы (ЛР)	36	18	18
Самостоятельная работа	144	90	54
Курсовая работа	+	+	
Часы на контроль	36	-	36
Виды промежуточной аттестации – экзамен, зачет с оценкой	+	+	+
Общая трудоемкость:			
академические часы	360	180	180
зач.ед.	10	5	5

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий
очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Начальные сведения о физике полупроводников и	Начальные сведения о базовых технологических операциях планарной технологии производства полупроводниковых ИМС. Начальные	2	4	-	10	16

	производстве полупроводниковых микросхем.	сведения об основных технологических маршрутах планарной технологии производства полупроводниковых ИМС.					
2	Основы моделирования явлений переноса.	Аналитическое описание полей температуры и концентрации примеси. Графическое отображение скалярных полей. Градиент температуры. Градиент концентрации примеси. Вектор плотности потока энергии в форме тепла в неподвижной среде. Закон Фурье. Вектор плотности потока вещества в неподвижной среде. Первый закон Фика. Коэффициент теплопроводности. Коэффициент диффузии. Дифференциальное уравнение переноса энергии в форме тепла. Уравнение баланса энтальпии. Перенос тепла в неподвижной среде. Уравнение нестационарной теплопроводности. Условия однозначности для задачи распространения тепла в неподвижной среде. Дифференциальное уравнение переноса массы примесного компонента в неподвижной среде. Уравнение баланса массы примесного компонента. Перенос массы примесного компонента в неподвижной среде. Уравнение нестационарной диффузии. Различные формы записи уравнения нестационарной диффузии. Условия однозначности для задачи переноса примесного компонента в неподвижной среде.	8	8	-	20	36
3	Диффузионное легирование, ионная имплантация и термическое окисление кремния.	Начальные сведения о режимах проведения операций диффузионного легирования, ионной имплантации и термического окисления кремния в планарной технологии полупроводниковых ИМС. Моделирование стадии загонки примеси. Моделирование термического окисления кремния. Уравнение для скорости роста окисной плёнки. Основное уравнение модели Дила-Гроува. Анализ основного уравнения модели Дила-Гроува. Кинетические закономерности процесса термического окисления кремния. Сравнение результатов моделирования операций диффузионного легирования, ионной имплантации и термического окисления кремния в планарной технологии с экспериментом.	10	8	8	20	46
4	Химическое осаждение из газовой фазы.	Начальные сведения о процессах химического осаждения из газовой фазы в технологии материалов и структур твёрдотельной электроники. Стадии протекания процесса химического осаждения из парогазовых смесей. Понятие лимитирующей стадии процесса. Аналитическое описание движения жидкости. Элементы гидродинамики вязкой жидкости. Гидродинамический и диффузионный пограничные слои. Диффузионный и кинетический режимы протекания процессов химического осаждения из газовой фазы. Примеры смены	8	8	4	20	40

		лимитирующей стадии в ходе процесса, протекающего в стационарных внешних условиях. Квазиравновесный режим водородного восстановления кремния. Равновесный выход конденсирующегося кремния. Система уравнений химического равновесия. Химическое равновесие в изобарно-изотермических условиях. Константа равновесия газовой химической реакции при умеренных давлениях. Закон действующих масс. Вычисление константы равновесия K_p химической реакции по справочным данным.					
5	Кристаллизация из расплавов и растворов-расплавов.	Исходные положения для моделирования процессов направленной кристаллизации. Уравнения материального баланса примесного компонента и баланса объёмов. Распределение нелетучей примеси в кристаллах, полученных методом нормальной направленной кристаллизации и методом Чохральского. Квазистатистический режим кристаллизации. Распределение нелетучей примеси в кристаллах, полученных зонной перекристаллизацией. Квазистатистический режим кристаллизации. Механизмы переноса примеси в жидкой фазе в процессах направленной кристаллизации. Эффективный коэффициент распределения примеси. Уравнение Бартон-Прима-Слихтера для расчёта эффективного коэффициента распределения примеси. Теоретический выход годного кристалла в процессах направленной кристаллизации.	8	8	6	20	42
Итого 4 семестр			36	36	18	90	180
6	Основные процессы в гетерогенных химико-технологических системах.	Процессы тепло- и массопередачи в неподвижной среде. Процессы в неоднородных средах. Стимулирование процессов переноса. Конвективный тепло- и массообмен. Режимы движения среды. Режимы и лимитирующие стадии химических процессов.	2	6	-	9	17
7	Технология процессов переработки сырьевых материалов	Процессы измельчения, рассеивания и дозирования. Характеристика процессов разделения и очистки. Жидкостная экстракция. Кристаллизационная очистка. Перегонка через газовую фазу. Электрохимические методы разделения и очистки	8	6	8	9	31
8	Кристаллизация и стеклование; механизмы и кинетика роста кристаллов.	Кристаллизация. Анализ процессов зарождения. Механизм и кинетика роста кристаллов. Ориентированная кристаллизация. Текстуры роста и механизмы их формирования.	8	8	-	9	25
9	Технология получения монокристаллических	Получение монокристаллов из жидкой фазы. Методы выращивания кристаллов из расплава: нормальная	10	8	-	9	27

	материалов.	кристаллизация, зонная плавка, вытягивание из расплава. Тепловые процессы на фронте кристаллизации. Получение монокристаллов из растворов-расплавов. Требования к растворителю. Основные режимы кристаллизации. Зонная плавка с градиентом температуры. Разновидности методов жидкофазной эпитаксии. Получение монокристаллов из газовой фазы. Метод сублимации-конденсации. Выращивание монокристаллов химическим осаждением из газовой фазы. Массоперенос в режиме молекулярного пучка. Методические и аппаратные особенности газовой эпитаксии кремния. Стимулированная кристаллизация. Управление кристаллической структурой материалов при полиморфных превращениях. Выращивание монокристаллов по механизму пар-жидкость-твердое тело.					
10	Технологическая схема изготовления керамики.	Выбор и подготовка исходных компонентов. Расчет шихты. Смешивание компонентов (помол). Обезвоживание и сушка. Гранулирование шихты. Формование заготовок (прессование). Высокотемпературный обжиг (спекание). Нанесение металлических электродов (металлизация). Поляризация керамики в электрическом поле.	4	4	4	9	21
11	Свойства керамических материалов.	Конденсаторная керамика. Способы получения керамики с высокой диэлектрической проницаемостью в широком интервале температур. Терморезистивные свойства позисторной керамики. ТКС позисторной керамики вблизи точки Кюри. Пьезокерамические материалы. Система цирконата-титаната свинца. Бессвинцовые пьезокерамики. Стеклокерамика (ситаллы) и их свойства.	4	4	6	9	23
Итого 5 семестр			36	36	18	54	144
Всего			72	72	36	144	324

5.2 Перечень лабораторных работ

Лабораторная работа № 1. Исследование процессов термического окисления кремния методом численного эксперимента.

Лабораторная работа № 2. Исследование процессов диффузионного легирования кремния методом численного эксперимента.

Лабораторная работа № 3. Исследование процесса водородного восстановления кремния из тетрахлорида кремния методом численного эксперимента.

Лабораторная работа № 4. Исследование процессов зонной перекристаллизации методом численного эксперимента.

Лабораторная работа № 5. Расчет шихты и синтез керамических материалов на ее основе.

Лабораторная работа № 6. Определение усадки, плотности, пористости и водопоглощения керамических материалов.

Лабораторная работа № 7. Металлизация и определение прочности сцепления электродов с поверхностью образцов керамических материалов.

Лабораторная работа № 8. Определение структурных фазовых переходов в керамических материалах методом диэлектрической спектроскопии.

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсовой работы в 4 семестре для очной формы обучения.

Примерная тематика курсовой работы: «Расчет состава газовой фазы и равновесного выхода кремния в процессе его водородного восстановления из SiCl_4 .» Исходное кремнийсодержащее вещество и состав газовой фазы выбирается в соответствии с вариантом работы.

Задачи, решаемые при выполнении курсовой работы:

1. Изучение теоретического материала по процессу химического осаждения кремния в ходе его водородного восстановления из хлорсиланов.

2. Выбор базисных реакций и расчет их констант равновесия по справочным данным о термодинамических свойствах реагентов.

3. Получение системы уравнений химического равновесия и расчет парциальных давлений компонентов газовой фазы в процессе водородного восстановления из хлорсиланов.

4. Определение равновесного выхода кремния в процессе его водородного восстановления из хлорсиланов. Анализ полученных результатов.

Курсовая работа включает в себя теоретическую часть и расчетно-пояснительную записку.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации

оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-6	знать основные процессы в гетерогенных химико-технологических системах; процессы разделения, очистки и легирования материалов электронной техники, кристаллизацию и стеклование; инструментальное оформление и организацию физико-технологических процессов;	Тест Контрольные задания для защиты лабораторных работ Контрольная работа	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь выполнять расчет основных параметров материалов и технологических параметров их изготовления; использовать технические средства для определения основных параметров технологического процесса; обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов;	Тест Контрольные задания для защиты лабораторных работ Контрольная работа	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть навыками расчета технологических процессов с применением пакетов прикладных программ; навыками использования технических средств для определения основных параметров технологического процесса; способностью выбора технологического процесса производства материалов электронной техники.	Выполнение лабораторных работ согласно индивидуальному графику	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 4, 5 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ПК-6	знать основные процессы в гетерогенных химико-технологических системах; процессы разделения, очистки и легирования материалов электронной техники, кристаллизацию и стеклование; инструментальное оформление и организацию физико-технических технологических процессов	Тест	Выполнение теста на 70-100%	Выполнение менее 70%
	уметь выполнять расчет основных параметров материалов и технологических параметров их изготовления; использовать технические средства для определения основных параметров технологического процесса; обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов;	Решение стандартных практических задач	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть навыками расчета технологических процессов с применением пакетов прикладных программ; навыками использования технических средств для определения основных параметров технологического процесса; способностью выбора	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

	технологического процесса производства материалов электронной техники.			
--	--	--	--	--

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Вакуумные методы осаждения позволяют получать пленки
 - а - проводниковых и резистивных материалов
 - б- диэлектрических материалов
 - в - полупроводниковых материалов
 - г - всё вышеперечисленное
2. Для получения тонких пленок тугоплавких и благородных металлов используется
 - а – метод диффузии
 - б- метод термического окисления
 - в- термическое вакуумное испарение
 - г – ионно-плазменное напыление
3. Направленное легирование полупроводников можно осуществить
 - а- методом ионной имплантации
 - б- диффузионным методом
 - в – все вышеперечисленное
4. Как влияет температура подложки на скорость эпитаксиального роста пленок?
 - а – не влияет
 - б - скорость эпитаксиального роста пленки увеличивается при использовании «горячей» подложки
 - в – скорость эпитаксиального роста пленки уменьшается при использовании «горячей» подложки
5. В кремниевых приборных структурах для формирования проводников и контактных площадок используются
 - а - обратносмещенные р-п переходы
 - б – пленки оксида кремния
 - в- тонкие пленки алюминия
6. В позитивных фоторезистах под действием облучения происходит
 - а -деструкция
 - б - изменение прозрачности
 - в - сшивка молекул
7. Основными носителями заряда в полупроводнике n-типа являются
 - а - ионы примеси
 - б – электроны
 - в – дырки

8. Выберите неверное утверждение:

В модели Дила-Гроува окисления кремния

- рост окисла кремния SiO_2 происходит в атмосфере сухого кислорода;
- рост окисла кремния SiO_2 происходит в парах воды;
- используется реакция окисления силана SiH_4 кислородом;
- рост окисла кремния SiO_2 происходит на границе раздела кремний-окисел.

9. При ионной имплантации примесь распределяется по закону:

- интеграла функции ошибок;
- линейному;
- параболическому;
- закону Гаусса.

10. Отметить бестигельные методы выращивания кристаллов:

- метод нормальной направленной кристаллизации;
- метод вертикальной зонной плавки;
- метод горизонтальной зонной плавки;
- метод Чохральского.

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Коэффициент распределения цинка в кремнии $K=1 \cdot 10^{-5}$. Оценить скорость направленной кристаллизации, при которой эффективный коэффициент распределения будет не выше $1 \cdot 10^{-2}$, если диффузионная длина $\delta=150$ мкм, и коэффициент диффузии $D=1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$.

2. Оценить, как изменится коэффициент распределения примеси, если скорость кристаллизации увеличить в 2 раза и в 10 раз?

3. Определить какая часть кремниевого слитка может быть использована как материал класса В4 при его очистке направленной кристаллизацией от примесей, имеющих эффективный коэффициент распределения $K=1 \cdot 10^{-3}$, если их исходная концентрация $c_0=0,05\%$.

4. Определить от каких примесей (с каким $K_{\text{эфф}}$) будет проходить очистка германиевого стержня при направленной кристаллизации, если ее проводить со скоростью 15 мм/ч. Принять $D=10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$, $\delta=100$ мкм.

5. Равновесный коэффициент распределения индия в кремнии $K=3 \cdot 10^{-4}$. Как изменится эта величина, если направленную кристаллизацию проводить со скоростью 0,01 и 0,1 м/ч. Принять $D=10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$, $\delta=60$ мкм.

6. Исходное содержание примесей в кристалле кремния массой 1 кг составляет $2 \cdot 10^{-2}$ г. Какая часть кристаллического стержня диаметром 27 мм может быть очищена зонной перекристаллизацией при одноразовом проходе зоной с $l=1$ см до концентрации примесей не выше $1 \cdot 10^{-5}\%$, если $K_{\text{эфф}}=1 \cdot 10^{-3}$.

7. Сформулируйте основные условия полной взаимной растворимости компонентов при образовании твердых растворов на основе бинарных по-

лупроводников.

8. Какое количество сурьмы необходимо для выращивания кристалла германия n -типа с удельным сопротивлением $\rho=0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ из расплава массой $m = 4 \text{ кг}$ в предположении равномерного распределения примеси по объему кристалла. Коэффициент распределения сурьмы между жидкой и твердой фазами $K=3\cdot 10^{-3}$, плотность расплава $d=5600 \text{ кг/м}^3$, подвижность электронов $\mu=0,38 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

9. Определить количество бора необходимое для выращивания кристалла германия p -типа с удельным сопротивлением $\rho=0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ из расплава массой $m=1 \text{ кг}$ в предположении равномерного распределения примеси по объему кристалла. Коэффициент распределения бора между жидкой и твердой фазами $K=20$, плотность расплава $d=5600 \text{ кг/м}^3$, подвижность дырок $\mu=0,19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

10. Оценить удельное сопротивление при 300 К кремния, легированного сурьмой, если в 1 кг материала содержится 22 мг сурьмы, подвижность электронов $0,19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Примесь распределена равномерно.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при 300 К , если ширина его запрещенной зоны $E_g = 1,12 \text{ эВ}$, а эффективные массы дырок и электронов $m^*=1,05m_0$, $m^*=0,56m_0$ соответственно.
2. Концентрация электронов проводимости в полупроводнике равна 10^{18} м^{-3} . Определить концентрацию дырок в этом полупроводнике, если известно, что собственная концентрация носителей заряда при этой же температуре равна 10^{16} м^{-3} .
3. В собственном германии ширина запрещенной зоны при температуре 300 К равна $0,665 \text{ эВ}$. На сколько надо повысить температуру, чтобы число электронов в зоне проводимости увеличилось в два раза? Температурным изменением эффективной плотности состояний для электронов и дырок при расчете пренебречь.
4. При комнатной температуре ширина запрещенной зоны в германии $E_g = 0,665 \text{ эВ}$, а собственная концентрация носителей заряда $n_i=2,1\cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Во сколько раз изменится собственная концентрация n_i , если температуру повысить до 200°С . Эффективные массы плотности состояний для электронов и дырок соответственно равны: $m^*=0,55m_0$, $m^*=0,388m_0$. Коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны $b = 3,9\cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$.
5. Определить, как изменится концентрация дырок в германии, содержащем мелкие доноры в концентрации $N_D=10^{22} \text{ м}^{-3}$, при его нагревании от 300 до 400 К . При расчете использовать данные задачи 4.
6. Найти полную концентрацию ионизированных примесей $N_{\text{и}}$ в

полупроводнике n-типа, если концентрация компенсирующих акцепторов N_a , а концентрация основных носителей заряда n .

7. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в арсениде галлия при температуре 300 и 500 К, если эффективные массы плотности состояний $m^* = 0,067m_0$, $m^* = 0,48m_0$, а температурное изменение ширины запрещенной зоны подчиняется закону: $E_g(T) = 1,5225,8 \cdot 10^{-4} T^2 / (T + 300)$.

8. Определить, как изменится концентрация электронов в арсениде галлия, легированном цинком до концентрации $N_{Zn} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, при повышении температуры от 300 до 500 К. Полагать, что при 300 К все атомы цинка полностью ионизированы.

9. В кристалле антимонида индия на каждые 10^6 атомов сурьмы приходится один атом кремния и два атома олова. Определить концентрации электронов и дырок в этом полупроводнике при комнатной температуре, если собственная концентрация носителей заряда в антимониде индия $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, а его плотность $d = 5780 \text{ кг/м}^3$.

10. В результате прецизионных структурных исследований установлено, что период решетки кристалла арсенида галлия $a = 0,565298 \text{ нм}$, а его плотность $d = 5316,62 \text{ кг/м}^3$. Полагая, что единственным видом нестехиометрических дефектов структуры являются вакансии в металлоидной подрешетке, определить точный состав твердой фазы и концентрацию дефектов. Плотность GaAs стехиометрического состава принять равной 5318 кг/м^3 .

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету с оценкой

4-ый семестр:

1. Технологический цикл изготовления типового планарного транзистора.
2. Методы получения и свойства окисных пленок кремния.
3. Создание рельефа в окисной маске с помощью фотолитографических операций.
4. Диффузия в условиях окисной маскировки. Основные способы осуществления диффузии.
5. Заключительные этапы изготовления и методы контроля кремниевых планарных транзисторов.
7. Уравнение движения жидкости. Уравнение неразрывности (закон сохранения массы движущейся жидкости).
8. Уравнение Навье-Стокса (уравнение движения несжимаемой вязкой жидкости).
9. Уравнение баланса массы примесного компонента.
10. Первый закон Фика. Коэффициент диффузии.
11. Второй закон Фика (уравнение нестационарной диффузии, различные формы записи уравнения нестационарной диффузии).
12. Уравнение конвективной диффузии.
13. Уравнение баланса энтальпии.

14. Плотность теплового потока. Закон Фурье.
15. Уравнение энергии.
16. Система уравнений переноса.
17. Модель Дила-Гроува термического окисления кремния. Получение основного уравнения модели.
18. Кинетические закономерности процесса термического окисления кремния и их объяснение в рамках модели Дила-Гроува.
19. Простейшие модели диффузионного легирования кремния. Стадия загонки примеси.
20. Простейшие модели диффузионного легирования кремния. Стадия разгонки примеси.
21. Начальные сведения о процессах химического осаждения из газовой фазы в процессах микро- и нанотехнологии.
22. Стадии протекания процесса химического осаждения из парогазовых смесей. Понятие лимитирующей стадии процесса.
23. Режимы протекания процессов химического осаждения из ПГС. Расчет скорости процесса в стационарном режиме.
24. Анализ расчета скорости процесса химического газофазного осаждения в стационарном режиме.
25. Квазиравновесный режим водородного восстановления кремния. Равновесный выход конденсирующегося кремния.
26. Компонентный состав и базисные химические реакции в системе Si-H-Cl в области высоких температур.
27. Система уравнений химического равновесия.
28. Упрощающие предположения, принимаемые при теоретическом описании процессов направленной кристаллизации. Уравнения материального баланса примесного компонента и баланса объёмов.
29. Распределение нелетучей примеси в кристаллах, полученных методом нормальной направленной кристаллизации и методом Чохральского.
30. Распределение нелетучей примеси в кристаллах, полученных однократной зонной перекристаллизацией однородно легированного исходного слитка.
31. Получение дифференциального уравнения, которому подчиняется распределение концентрации нелетучей примеси в кристаллах, полученных многократной зонной перекристаллизацией.
32. Уравнение Бартона-Прима-Слихтера для расчёта эффективного коэффициента распределения примеси.
33. Теоретический выход годного кристалла в процессах направленной кристаллизации.

7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену:

5-ый семестр:

1. Технологический процесс. Основные понятия.
3. Основные процессы гетерогенных химико-технологических систем.

4. Методы вытягивания монокристаллов из расплава. Технологические особенности метода Чохральского. Выращивание монокристаллов с пьедестала.
5. Процессы измельчения и рассеивания твёрдых тел.
6. Равновесный и эффективный коэффициенты распределения примесей в кристаллизационных процессах.
7. Характеристика чистоты вещества. Общая характеристика процессов разделения и очистки материалов.
8. Получение профильных монокристаллов. Способ Степанова.
9. Сорбционные процессы. Очистка материалов с помощью метода ионного обмена.
10. Способы получения монокристаллов. Получение монокристаллов из твердой и жидкой фазы. Методы нормальной направленной кристаллизации.
11. Хроматографические методы очистки материалов.
12. Процессы кристаллизации как фазовые переходы первого рода. Понятие критического размера зародыша.
13. Процессы жидкостной экстракции в очистке материалов.
14. Кристаллизующиеся и стеклующиеся системы.
15. Характеристика чистоты вещества. Общая характеристика процессов разделения и очистки материалов.
16. Кристаллизационные процессы в очистке материалов.
17. технология получения монокристаллов полупроводникового кремния.
18. Процессы разделения и очистки: электрохимический, в центробежном поле, с помощью диффузии, в скрещенных электрическом и магнитном полях.
19. Механизм и кинетика роста кристаллов. Сингулярные, вицинальные и несингулярные грани в кристаллах.
20. Очистка материалов с помощью перегонки через газовую фазу.
21. Очистка веществ с помощью химических транспортных реакций.
22. Выращивание монокристаллов из растворов. Способы создания пересыщения в растворе.
23. Способы выражения пересыщения в газовой, жидкой и твёрдой фазах. Скорость зародышеобразования в газовой фазе.
24. Методы зонной плавки. Особенности бестигельной зонной плавки. Метод Вернейля.
25. Гетерогенный механизм образования жидкой фазы при конденсации пара на подложку.
26. Легирование кристаллов в процессе выращивания из жидкой фазы. Распределение примесей при нормальной направленной кристаллизации и при зонной плавке.
27. технология получения монокристаллов полупроводникового арсенида галлия.
28. Методы получения однородно легированных монокристаллов.

Механическая подпитка расплава твердой, жидкой и газовой фазой.

29. Выращивание монокристаллов из газовой фазы. Замкнутые и проточные системы.

30. Сегрегационные методы выравнивания состава кристаллов.

31. Легирование кристаллов в твердой фазе.

32. Керамика. Фазы керамики.

33. Технологическая схема изготовления керамики.

34. Требования, предъявляемые к сырьевым материалам.

35. Выбор и подготовка исходных компонентов.

36. Расчет шихты.

37. Способы гранулирования шихты: обычное гранулирование, гранулирование прессованием, распылительной сушкой и др.

38. Основные методы формования заготовок.

39. Методы прессования: холодное прессование в пресс-формах; мундштучное прессование; изостатическое и взрывное прессование; вибрационное уплотнение; горячее прессование. Достоинства и недостатки различных методов прессования.

40. Горячее литье. Основные методы: намораживание, сливное литье, литье в кокиль, центробежное литье, непрерывное литье, литье под давлением.

41. Обжиг. Процессы в ходе обжига. Однократный и двукратный обжиг.

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Экзамен проводится по билетам, каждый из которых содержит 3 вопроса:

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент не ответил ни на один вопрос.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил на один вопрос и дополнительные качественные вопросы.

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент ответил на два вопроса и дополнительные качественные вопросы.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент ответил на три вопроса по билету и дополнительные вопросы.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Начальные сведения о физике полупроводников и производстве полупроводниковых микросхем.	ПК-6	Тест, контрольная работа, экзамен.
2	Основы моделирования явлений переноса.	ПК-6	Тест, контрольная работа, экзамен.
3	Диффузионное легирование, ионная имплантация и	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита лабораторных

	термическое окисление кремния.		работ, экзамен.
4	Химическое осаждение из газовой фазы.	ПК-6	Защита лабораторных работ, требования к курсовой работе, экзамен.
5	Кристаллизация из расплавов и растворов-расплавов.	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, экзамен.
6	Основные процессы в гетерогенных химико-технологических системах.	ПК-6	Контрольная работа, экзамен.
7	Технология процессов переработки сырьевых материалов.	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, экзамен.
8	Кристаллизация и стеклование; механизмы и кинетика роста кристаллов.	ПК-6	Тест, контрольная работа, экзамен.
9	Технология получения монокристаллических материалов.	ПК-6	Тест, контрольная работа, экзамен.
10	Технологическая схема изготовления керамики.	ПК-6	Контрольная работа, защита лабораторных работ, экзамен.
11	Свойства керамических материалов.	ПК-6	Контрольная работа, защита лабораторных работ, экзамен.

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование и контрольные работы проводятся с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 40 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Защита курсовой работы и отчета по лабораторным работам осуществляется согласно требованиям, предъявляемым к работе, описанным в методических материалах. Примерное время защиты на одного студента составляет 20 мин.

8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

1. Александров С.Е., Греков Ф.Ф. Технология полупроводниковых материалов: учебное пособие. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 240 с. - Текст : электронный. - URL: <https://e.lanbook.com/book/168401>.
2. Смирнов Ю.А. Физические основы электроники: учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 560 с. - Текст : электронный. - URL: <https://e.lanbook.com/book/168522>.
3. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. /В.Н. Черняев. – М.: Высшая школа, 1987. – 375 с.: ил.
4. Физические основы твёрдотельной электроники. Часть 1: Учебное пособие/О.И. Сысоев. Воронеж, 2012.-213 с.: ил.
5. Сысоев О.И. Физико-химические основы технологии материалов и структур твёрдотельной электроники. /О.И. Сысоев, Л.Н. Коротков, И.В. Бабкина. ВГТУ 2010. –215 с.
6. Крапухин В.В. Технология материалов электронной техники. Теория процессов полупроводниковой технологии: учебник для вузов. /В.В. Крапухин, И.А. Соколов, Г.Д. Кузнецов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: «МИСИС», 1995. – 493 с.: ил.
7. Соколов И.А. Расчёт процессов полупроводниковой технологии. /Соколов И.А. – М.: «Металлургия», 1994. – 176 с.: ил.
8. Технология СБИС: в 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. /Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с., ил.
9. Технология СБИС: в 2-х кн. Кн. 2. Пер. с англ. /Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 453 с., ил.
10. Гриднев С.А., Коротков Л.Н. Технология керамических материалов: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2011. - 112 с.
11. [191-2012] Методические указания к выполнению лабораторных работ №1-2 по дисциплине «Физико-химические основы технологии материалов и структур твёрдотельной электроники для студентов направления «Техническая физика» (профиль «Физическая электроника») очной формы обучения. (Электронный вариант).
12. [192-2012] Методические указания к выполнению лабораторных работ №3-4 по дисциплине «Физико-химические основы технологии материалов и структур твёрдотельной электроники для студентов направления «Техническая физика» (профиль «Физическая электроника») очной формы обучения. (Электронный вариант).
13. Калгин А.В. Методические указания к выполнению лабораторных работ по технологии МЭТ. – Воронеж: ВГТУ. 2015. Эл.

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных

профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

Microsoft Word, Microsoft Excel, Internet Explorer, математический пакет Mathcad, графическая обработка экспериментальных данных Origin 8.0.

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Специализированная лекционная аудитория, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой.

Дисплейный класс кафедры ТТЭ и научно-учебная лаборатория технологии керамических материалов и измерения их физических свойств с научно-исследовательскими измерительными стендами, комплексами и оборудованием.

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Физико-химические основы технологии материалов и структур физической электроники» читаются лекции, проводятся практические занятия и лабораторные работы, выполняется курсовая работа.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета скорости роста кристалла, содержания примеси в кристалле, выхода годного кристалла. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Методика выполнения курсовой работы изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсовой работы должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсовой работы, защитой курсовой работы.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом

занятие	лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начинаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом, экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
----------	-----------------------------	----------------------------	--