

**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

«Технологии микро- и наноэлектроники»

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

Бабкина И.В.

Заведующий кафедрой
Твердотельной электроники

Небольсин

Небольсин В.А.

Руководитель ОПОП

Янченко

Янченко Л.И.

Воронеж 2024

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины

Изучение закономерностей протекания основных технологических операций, применяемых при изготовлении изделий электроники и нанoeлектроники.

1.2. Задачи освоения дисциплины

Изучить расчетные и экспериментальные методы определения режимов технологических операций.

Изучить принципы действия основных элементов вакуумного оборудования и технологических устройств.

Сформировать представление о работе на технологическом оборудовании.

Изучить типовые технологические процессы изготовления изделий электроники и нанoeлектроники.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Технологии микро- и нанoeлектроники» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений (дисциплина по выбору) блока Б1.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Технологии микро- и нанoeлектроники» 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 технологические методы, применяемые при изготовлении изделий электроники и нанoeлектроники; физические закономерности, лежащие в основе этих методов; инструментальное оформление и организацию технологических процессов изготовления изделий электронной техники; пакеты прикладных программ для расчетов технологических процессов изготовления изделий электронной техники; способы управления технологическим процессом.
	Уметь выполнять расчет основных параметров конкретных изделий и технологических параметров их изготовления; использовать технические средства для определения основных параметров технологического процесса изготовления изделий электронной техники; определять экспериментальным или расчетным путем

	оптимальные режимы проведения отдельных технологических операций изготовления изделий электронной техники; выполнять работы по технологической подготовке производства изготовления изделий электронной техники.
	Владеть навыками расчета технологических процессов изготовления изделий электронной техники с применением пакетов прикладных программ; навыками использования технических средств для определения основных параметров технологического процесса производства изделий электронной техники; способностью выбора технологического процесса производства изделий электронной техники; способностью выполнять работы по технологической подготовке производства изделий электронной техники.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Технологии микро- и наноэлектроники» составляет 4 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий
очная форма обучения

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		7
Аудиторные занятия (всего)	90	90
В том числе:		
Лекции	36	36
Практические занятия (ПЗ)	36	36
Лабораторные работы (ЛР)	18	18
Самостоятельная работа	54	54
Курсовой проект	+	+
Виды промежуточной аттестации – зачет с оценкой	+	+
Общая трудоемкость:		
академические часы	144	144
зач.ед.	4	4

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	Введение. Механическая и физико-химическая обработка поверхности.	Введение. Предмет и задачи дисциплины. Основные тенденции развития полупроводникового приборостроения и микроэлектроники.	4	4		6	14

		Краткая характеристика физико-химических основ, определяющих процессы полупроводникового цикла на примере обобщенной схемы планарно-эпитаксиального процесса производства ИМС. Основные задачи и виды механической обработки полупроводников. Кристаллографическая ориентация слитков. Методы резания слитков на пластины и кристаллы. Плоское шлифование и полирование пластины. Механизмы шлифования. Механизмы полирования. Химические процессы в полировании полупроводников. Физические методы обработки материалов микроэлектроники. Ультразвуковая обработка. Дефекты механической обработки, способы их контроля. Электроэрозионная обработка. Обработка материалов электронными, ионными и лазерными пучками.					
2	Химическая, электрохимическая, ионно-плазменная и плазмохимическая обработка материалов.	Области применения химических, электрохимических и ионно-плазменных процессов в производстве полупроводниковых приборов и ИМС. Кинетика и механизмы химического травления. Газовое высокотемпературное травление. Электрохимические процессы в производстве полупроводниковых приборов. Кинетика электрохимических процессов. Механизмы электрохимического травления. Методы локализации электрохимической обработки. Ионно-плазменная обработка. Механизмы ионной, ионно-химической и плазмо-химической обработки. Оборудование для обработки в плазме. Системы с магнетронным распылением. Особенности плазмо-химической обработки полупроводников, диэлектриков, металлов. Методы очистки поверхности.	4	4	4	6	18
3	Литографические способы обработки поверхности технологических слоев.	Фотолитография и ее роль в производстве полупроводниковых приборов и ИМС. Фотохимические процессы в фоторезистах. Типы фоторезистов, их характеристики и особенности применения. Фотошаблоны. Технология изготовления фотошаблонов. Контактная фотолитография. Автоматизация процесса фотолитографии в условиях промышленного производства. Краткая характеристика оборудования для контактной фотолитографии. Схема установки совмещения и экспонирования. Проекционная фотолитография. Фотолитография на микро зазоре. Позиционная (шаговая) печать. Рентгенолитография. Электролитография. Растровое сканирование. Векторное сканирование. Схема электронно-лучевой установки литографии. Применения ионных пучков для литографирования поверхности технологических слоев. Сравнительные характеристики различных методов	4	4		6	14

		литографирования поверхности.					
4	Эпитаксиальные структуры.	Эпитаксиальные процессы в производстве полупроводниковых приборов и ИМС. Классификация эпитаксиальных процессов. Механизмы и кинетика процесса эпитаксии. Эпитаксия кремния. Эпитаксия полупроводниковых соединений A_3B_5 и их твердых растворов. Легирование эпитаксиальных слоев в процессе роста. Автолегирование. Оборудование для выполнения процессов эпитаксии из газовой и жидкой фазы. Реакторы для газовой эпитаксии, их особенности. Требования к установкам для газовой эпитаксии. Факторы, влияющие на конструкцию установки. Типы реакторов эпитаксиального наращивания: вертикальный и горизонтальный. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Дефекты эпитаксиальных слоев, способы их контроля и устранения. Дефекты эпитаксиальных слоев, способы их контроля и устранения.	4	4		6	14
5	Диффузионное и ионное легирование.	Место диффузионных процессов в полупроводниковой технологии. Кинетика процесса диффузии. Механизмы диффузии. Математические основы процесса диффузии. Особенности диффузии примесей в кремнии и арсениде галлия. Технологические разновидности диффузионного легирования. Особенности применения диффузии в биполярной и МДП-технологии. Дефекты диффузионных слоев, способы их обнаружения и устранения. Методы геттерирования структурных и примесных дефектов в технологии микроэлектроники. Методы исследования диффузионных слоев. Принцип легирования методом внедрения ионов в твердое тело. Возможности и перспективы применения ионного легирования в производстве ИМС. Оборудование для проведения ионного легирования. Основные параметры и характеристики процесса ионного легирования. Радиационные дефекты. Механизмы аморфизации поверхности. Отжиг радиационных дефектов. Методы активации примесей. Технология ионного легирования. Особенности применения ионного легирования в планарной биполярной и МДП-технологии. Способы контроля имплантированных слоев	4	4	8	6	22
6	Методы стабилизации и защиты поверхности	Характеристика поверхности полупроводника. Стабилизация поверхности методом поверхностных окислительно-восстановительных реакций. Защита поверхности кремния окислением. Структура и свойства стеклообразного диоксида кремния. Кинетика и механизмы окисления в различных средах. Нанесение оксидных покрытий. Покрытия из нитрида кремния. Нанесение нитридных	4	4	6	6	20

		покрытий методом аммонолиза моносилана или галлоидных соединений кремния. Плазмохимические автоматизированные системы нанесения. Свойства нитридных покрытий. Покрытия из аморфного оксида алюминия. Защита поверхности легкоплавкими стеклами.					
7	Контактные системы и методы получения контактной разводки.	Понятие омического контакта. Основные характеристики омических контактов и их влияние на параметры полупроводниковых приборов и ИМС. Процесс осаждения тонких пленок. Плоские и объемные выводы и методы их формирования.	4	4		6	14
8	Методы изоляции элементов ИМС и пассивные элементы интегральных микросхем.	Методы создания внутрисхемной электрической изоляции полупроводниковых ИМС. Изоляция с помощью обратно смещенных диффузионных р-п-переходов. Варианты диэлектрической изоляции: эпоксид-процесс, декаль-метод, изопланар, полипланар. Изоляция методами локальной эпитаксии, создание структуры "кремний на сапфире" Роль пассивных элементов и их влияние на эксплуатационные характеристики ИМС.	4	4		6	14
9	Основные типовые конструкции полупроводниковых приборов и ИМС.	Основные требования, предъявляемые к конструкции полупроводниковых приборов и ИМС. Типовые конструкции полупроводниковых дискретных диодов и транзисторов. Типовые конструкции основных видов ИМС. Способы герметизации и контроля герметичности корпусов полупроводниковых приборов и ИМС.	4	4		6	14
Итого			36	36	18	54	144

5.2 Перечень лабораторных работ

1. Формирование биполярного транзистора с помощью диффузии.
2. Двумерное распределение ионов под краем маски.
3. Напыление пленки SiO_2 методом ионно-лучевого напыления.
4. Ионно-плазменное травление пленки SiO_2 .

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

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсового проекта в 7 семестре для очной формы обучения.

Примерная тематика курсового проекта: «Разработка технологии интегрального МОП транзистора с кремниевым затвором»

Задачи, решаемые при выполнении курсового проекта:

1. Физико-технологические особенности изготовления МОП транзистора.
2. Разработка технологии изготовления интегрального МОП транзистора с кремниевым затвором.
3. Определить дозу (N_1) и энергию (E_1) ионов при имплантации, необходимые для создания зон истока и стока для МОП транзистора на

кремнии, если задано: исходные данные по вариантам.

4. Рассчитать профили распределения примеси в транзисторе, полученном ионной имплантацией.

Курсовой проект включает в себя графическую 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 технологические методы, применяемые при изготовлении изделий электроники и наноэлектроники; физические закономерности, лежащие в основе этих методов; инструментальное оформление и организацию технологических процессов изготовления изделий электронной техники; пакеты прикладных программ для расчетов технологических процессов изготовления изделий электронной техники; способы управления технологическим процессом.	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь выполнять расчет основных параметров конкретных изделий и технологических параметров их изготовления; использовать технические средства для определения основных параметров технологического процесса изготовления изделий электронной техники; определять экспериментальным или расчетным путем оптимальные режимы проведения отдельных технологических операций изготовления изделий электронной техники; выполнять работы по технологической подготовке производства изготовления изделий электронной техники.	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками расчета технологических процессов изготовления изделий электронной техники с применением пакетов	Решение стандартных практических задач, выполнение плана	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

	прикладных программ; навыками использования технических средств для определения основных параметров технологического процесса производства изделий электронной техники; способностью выбора технологического процесса производства изделий электронной техники; способностью выполнять работы по технологической подготовке производства изделий электронной техники.	работ по разработке курсового проекта.	программах	программах
--	---	--	------------	------------

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 7 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-6	Знать основные технологические методы, применяемые при изготовлении изделий электроники и нанoeлектроники; физические закономерности, лежащие в основе этих методов; инструментальное оформление и организацию технологических процессов изготовления изделий электронной техники; пакеты прикладных программ для расчетов технологических процессов изготовления изделий электронной техники; способы управления технологическим процессом.	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	Уметь выполнять расчет основных параметров конкретных	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и	Продемонстрирован верный ход решения всех,	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве	Задачи не решены

	изделий и технологических параметров их изготовления; использовать технические средства для определения основных параметров технологического процесса изготовления изделий электронной техники; определять экспериментальным или расчетным путем оптимальные режимы проведения отдельных технологических операций изготовления изделий электронной техники; выполнять работы по технологической подготовке производства изготовления изделий электронной техники.		получены верные ответы	но не получен верный ответ во всех задачах	задач	
	Владеть навыками расчета технологических процессов изготовления изделий электронной техники с применением пакетов прикладных программ; навыками использования технических средств для определения основных параметров технологического процесса производства изделий электронной техники; способностью выбора	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

технологического процесса производства изделий электронной техники; способностью выполнять работы по технологической подготовке производства изделий 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.Какая ширина запрещенной зоны кремния?

- a)1,6 эВ
- b)0,98 эВ
- c)1,12 эВ
- d)8,9 эВ

Правильный ответ c).

2.Какой элемент обязательно входит в состав газов травителей алюминия?

- a)Хлор
- b)Фтор
- c)Йод
- d)Бор

Правильный ответ a).

3.Применение какого метода обеспечивает лучшую очистку поверхности для молекулярно-лучевой эпитаксии?

a)Очистка поверхности с помощью пучка низко-энергетических ионов инертного газа

b)Высокотемпературный отжиг

Правильный ответ a).

4.Какой из методов окисления применяется наиболее часто?

- a)Термическое окисление
- b)Осаждение SiO_2 из газовой фазы.

Правильный ответ a).

5.В каком диапазоне температур применима модель Дила-Гроува?

- a)300-700 С
- b)700-1300 С
- c)900-1100 С

Правильный ответ b)

6.Для чего формируют скрытый n⁺-слой при производстве биполярных

ИС?

a)Для уменьшения сопротивления коллектора

б)Для повышения напряжения пробоя перехода коллектор –база
с)Для электрической изоляции приборов, находящихся на одной подложке.

Правильный ответ а)

7.С помощью какого из статистических распределений описывается профиль распределения легирующей примеси при ионной имплантации?

- а)Распределение Стьюдента
- б)Распределение Гаусса
- с)Распределение Ферми-Дирака

Правильный ответ б)

8.Какой толщины оксидную пленку можно получить при термическом окислении?

- а)0,3-0,4 мкм
- б)1-2 мкм
- с)9-12мкм
- д)Без ограничений

Правильный ответ б).

9.По какому механизму диффундируют В и Р?

- а)Диссоциативному
- б)Междоузельному
- с)Вакансионному
- д)Краудинный

Правильный ответ с)

10.К металлизации предъявляется требование:

- а)Высокое удельное сопротивление
- б)Низкая пластичность
- с)Хорошая адгезия

Правильный ответ с)

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания р-п-перехода в случае двухстадийной диффузии фосфора в кремний с электропроводностью р-типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см, проводимой в режиме: $T_1=1050^\circ\text{C}$, $t_1 = 10$ мин, $T_2 = 1150^\circ\text{C}$, $t_2 = 2$ ч.

- 1. 3,5 мкм
- 2. 2,5 мкм
- 3. 4,5 мкм

2. Рассчитать распределение примеси для двухстадийной диффузии фосфора в кремний, проводимой в режиме: $T_1=1250^\circ\text{C}$, $t_1 = 10$ мин, $T_2= 1150^\circ\text{C}$, $t_2=2$ ч. Определить глубину залегания р-п-перехода.

- 1. 4,35 мкм
- 2. 5,5 мкм
- 3. 2,5 мкм

3. Рассчитать профиль распределения концентрации примеси в п-р-п-структуре, полученной последовательной диффузией бора и фосфора в кремний с электропроводностью п-типа и удельным сопротивлением 0,15

Ом·см, проводимой в режимах: $T_a=1200^\circ\text{C}$, $t_a = 1$ ч, $T_d=1100^\circ\text{C}$, $t_d = 2$ ч. Поверхностная плотность атомов бора $N_a=5\cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$, диффузия фосфора ведется из неограниченного источника примеси с поверхностной концентрацией, равной предельной растворимости. С помощью этих кривых найти глубину залегания эмиттерного и коллекторного переходов.

1. 1,2 мкм; 3,5 мкм

2. 2,2 мкм; 3,5 мкм

3. 1,2 мкм; 5,5 мкм

4. Определить температуру разгонки мышьяка, предварительно внедренного с помощью ионной имплантации в кремний электропроводностью р-типа и удельным сопротивлением 1 Ом см, если распределение должно обладать глубиной залегания р-п-перехода $x_j=0,5$ мкм, поверхностная концентрация $C_0=1,5\cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$, а длительность процесса составляет 1ч. Вычислить количество атомов мышьяка N , которое должно быть внедрено в кремний.

1. 1070°C ; $2,5\cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$

2. 1170°C ; $2,5\cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$

3. 1070°C ; $5,5\cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$

5. Определить режим диффузии, проводимой в одну стадию при постоянной поверхностной концентрации, если распределение должно обладать глубиной залегания р-п-перехода $x_j=0,5$ мкм, поверхностная концентрация $C_0=1,5\cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$, а длительность процесса составляет 1ч, кремний электропроводностью р-типа и удельным сопротивлением 1 Ом см.

1. 1080°C ;

2. 1180°C ;

3. 1050°C ;

6. Определить температуры и длительности процессов загонки и разгонки в случае двухстадийной диффузии бора в кремний с электропроводностью п-типа, с удельным сопротивлением 10 Ом·см, если искомое распределение примеси должно иметь следующие параметры: $C_{02}=5\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$, $x_j=2,5$ мкм.

1. 1150°C ; 40 мин

2. 1250°C ; 40 мин

3. 1150°C ; 20 мин

7. Определить режим загонки (T_{a1} , $t_{a1}N_a$) и разгонки (T_{a2} , t_{a2}) при базовой диффузии бора и режим загонки T_d , t_d при эмиттерной диффузии фосфора в кремний, если задано: $C_b = 5\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$, $x_{j\phi}=1,2$ мкм, $x_{jK}=3,5$ мкм, $C_{Oa} = 3,3\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$, $C_{од}=1,2\cdot 10^{21}\text{ см}^{-3}$.

1. $T_{a1}=1060^\circ\text{C}$, $t_{a1}=10$ мин, $N_a=5\cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$, $T_{a2}=1150^\circ\text{C}$, $t_{a2}=170$ мин

2. $T_{a1}=1060^\circ\text{C}$, $t_{a1}=20$ мин, $N_a=5\cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$, $T_{a2}=1150^\circ\text{C}$, $t_{a2}=170$ мин

3. $T_{a1}=1060^\circ\text{C}$, $t_{a1}=10$ мин, $N_a=5\cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$, $T_{a2}=1150^\circ\text{C}$, $t_{a2}=70$ мин

8. Какое количество сурьмы необходимо для выращивания кристалла германия n -типа с удельным сопротивлением $\rho=0,01$ Ом·м из расплава массой $m = 4$ 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. Определить количество атомов бора, которое необходимо ввести в структуру методом ионной имплантации для создания области базы, и режим разгонки T_{a2} , t_{a2} , а также количество атомов фосфора N_d , которое необходимо ввести с помощью ионной имплантации для создания эмиттерной области, и режим разгонки T_d , t_d если концентрация донорной примеси в исходном эпитаксиальном слое кремния с электропроводностью n -типа составляет $S_v = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $x_{ij}=1 \text{ мкм}$, $x_{ik} = 2 \text{ мкм}$, $C_{oa} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $C_{0d} = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

1. $T_d=1010^\circ\text{C}$, $t_d=56 \text{ мин}$, $N_B=2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $N_F=1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2}=1150^\circ\text{C}$, $t_{a2}=17 \text{ мин}$

2. $T_d=1110^\circ\text{C}$, $t_d=56 \text{ мин}$, $N_B=2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $N_F=1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2}=1150^\circ\text{C}$, $t_{a2}=17 \text{ мин}$

3. $T_d=1010^\circ\text{C}$, $t_d=56 \text{ мин}$, $N_B=2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $N_F=1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2}=1100^\circ\text{C}$, $t_{a2}=17 \text{ мин}$

2. Рассчитать средний полный пробег ионов бора с энергией $E=100 \text{ кэВ}$ в кремнии

1. $0,5 \text{ мкм}$

2. $1,5 \text{ мкм}$

3. 1 мкм

3. Рассчитать R_p и ΔR_p ионов $^{11}\text{B}^+$ с энергией 100 кэВ в кремнии.

1. $R_p = 0,34 \text{ мкм}$, $\Delta R_p=0,09 \text{ мкм}$

2. $R_p = 0,5 \text{ мкм}$, $\Delta R_p=0,07 \text{ мкм}$

3. $R_p = 0,24 \text{ мкм}$, $\Delta R_p=0,05 \text{ мкм}$

4. Рассчитать профиль распределения концентрации примеси в транзисторной структуре, образованной имплантацией $^{11}\text{B}^+$ и $^{31}\text{P}^+$ в кремний с электропроводностью n -типа, если $S_v=10^{16} \text{ см}^{-3}$, $E_a=100 \text{ кэВ}$, $N_a=5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $E_d = 200 \text{ кэВ}$, $N_d= 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

5. Построить распределение концентрации ионов бора в кремнии, внедренных с энергией 40 кэВ и дозой облучения $6,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ через пленку диоксида толщиной $d_1 = 0,2 \text{ мкм}$.

6. Определить энергию E , необходимую для того, чтобы средний нормальный пробег ионов фосфора в кремнии составил $R_p=0,1 \text{ мкм}$.

1. $E = 87 \text{ кэВ}$

2. $E = 107 \text{ кэВ}$

3. $E = 57$ кэВ

7. Определить энергию ионов и дозу облучения, необходимые для создания р-п-перехода на глубине $x_i = 0,3$ мкм с помощью имплантации фосфора в кремний с электропроводностью р-типа и с $C_b = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, если необходимо обеспечить $C_{\text{max}} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

1. $E = 110$ кэВ, $N = 4.75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

2. $E = 100$ кэВ, $N = 3.75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

3. $E = 150$ кэВ, $N = 5.75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

8. Рассчитать дозы N_a , N_d энергии E_a , E_d для создания структуры п-р-п-транзистора на кремнии с толщиной базовой области $\omega = 0,1$ мкм, глубиной залегания эмиттерного перехода $x_{iэ} = 0,2$ мкм, концентрацией доноров в эпитаксиальном слое $C_B = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и максимальными концентрациями акцепторной и донорной примесей $C_{\text{max а}} = 3 \cdot 10^{18}$, $C_{\text{max д}} = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Создание эмиттерной и базовой областей производится имплантацией фосфора и бора соответственно.

1. $E_a = 40$ кэВ, $E_d = 80$ кэВ, $N_a = 4.0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $N_d = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

2. $E_a = 60$ кэВ, $E_d = 40$ кэВ, $N_a = 4.0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $N_d = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

3. $E_a = 20$ кэВ, $E_d = 100$ кэВ, $N_a = 4.0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $N_d = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

9. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при 300 К, если ширина его запрещенной зоны $E_g = 1,12$ эВ, а эффективные массы дырок и электронов $m^* = 1,05m_0$, $m^* = 0,56m_0$ соответственно.

10. 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} .

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

1. Требования к полупроводниковым материалам, классификация полупроводниковых материалов, номенклатура и обозначения Ge, Si, $A^{III}B^V$.

2. Методы ориентации монокристаллов.

3. Механическая обработка полупроводниковых материалов, методы резания слитков на пластины и кристаллы, шлифование и полирование пластин.

4. Контроль качества пластин и кристаллов после механической обработки.

5. Цели технохимических процессов подготовки подложек, виды загрязнений полупроводниковых подложек, отмывка полупроводниковых подложек.

6. Химическая и электрохимическая обработка поверхности полупроводников, кинетика процесса химического травления.

7. Механизмы травления полупроводников.

8. Ионно-плазменное травление полупроводников.

9. Фоторезисты, критерии применимости фоторезистов.

10. Фотошаблоны и способы их получения, промышленное изготовление фотошаблонов.

11. Контактная фотолитография.

12. Методы повышения качества формирования изображения в производстве полупроводниковых приборов и ИМС, проекционная оптическая фотолитография, рентгенолитография, электронолитография.
 13. Дефекты фотолитографического процесса.
 14. Классификация эпитаксиальных процессов.
 15. Кинетика и механизмы процессов эпитаксии.
 16. Автоэпитаксия кремния.
 17. Гетероэпитаксия кремния.
 18. Эпитаксия полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ и твердых растворов на их основе.
 19. Эпитаксия карбида кремния.
 20. Дефекты эпитаксиальных слоев.
 21. Диффузия, распределение примеси при диффузии.
 22. Технологические приемы получения диффузионных структур.
 23. Методы расчетов диффузионных структур.
 24. Определение режимов диффузии.
 25. Диффузионные процессы при изготовлении ИМС.
 26. Дефекты и методы контроля диффузионных структур.
 27. Основные явления при имплантации, средний полный пробег иона, пробег в многокомпонентных веществах, распределение пробегов ионов.
 28. Принцип действия и конструкция ионно-лучевого ускорителя, вещества — источники ионов, режимы ионной имплантации.
 29. Отжиг и диффузия после ионной имплантации
 30. Методы расчетов ионно-имплантированных структур, определение режимов имплантации.
 31. Методы контроля ионно-имплантированных структур.
 32. Требования, предъявляемые к защитным диэлектрическим пленкам, кинетика термического окисления кремния.
 33. Термическое окисление кремния в парах воды, в сухом кислороде и во влажном кислороде.
 34. Пиролитическое осаждение оксидных пленок кремния, анодное окисление кремния.
 35. Осаждение пленок оксида кремния термическим испарением, реактивное катодное распыление оксида кремния.
 36. Химическое осаждение пленок нитрида кремния, реактивное катодное осаждение пленок нитрида кремния.
 37. Контроль качества защитных диэлектрических пленок диоксида и нитрида кремния.
 38. Омические контакты, контактные материалы и виды контактных систем.
 39. Методы формирования омических контактов и контактных систем.
 40. Особенности процесса сборки, присоединение кристалла к основанию корпуса.
 41. Присоединение выводов, герметизация кристалла при сборке.
- 7.2.5 Примерный перечень экзаменационных вопросов.**

Не предусмотрено учебным планом.

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация осуществляется по нескольким критериям:

1. Тестирование по темам курса тест-задания.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил правильно на 40% вопросов и меньше.
2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил правильно на 40-60% вопросов.
3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент ответил правильно на 60-80% вопросов.
4. Оценка «Отлично» ставится, если студент ответил правильно на 80% вопросов и более.

2. Ответы на семинарских занятиях по теме курса.

3. Подготовка и защита курсового проекта.

4. Зачет с оценкой.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов.

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Введение. Механическая и физико-химическая обработка поверхности.	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта.
2	Химическая, электрохимическая, ионно-плазменная и плазмохимическая обработка материалов.	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита курсового проекта.
3	Литографические способы обработки поверхности технологических слоев.	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта.
4	Эпитаксиальные структуры.	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта.
5	Диффузионное и ионное легирование.	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита курсового проекта, решение практических задач.
6	Методы стабилизации и защиты поверхности	ПК-6	Контрольная работа, защита лабораторных работ, защита курсового проекта.
7	Контактные системы и методы получения контактной разводки.	ПК-6	Контрольная работа, защита курсового проекта.
8	Методы изоляции элементов ИМС и пассивные элементы интегральных микросхем.	ПК-6	Контрольная работа, защита курсового проекта.
9	Основные типовые конструкции полупроводниковых приборов и ИМС.	ПК-6	Контрольная работа, защита курсового проекта.

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

Зачет с оценкой проводится по билетам, каждый из которых содержит 2 вопроса. Критерии оценивания: оценка «отлично» - содержание ответа исчерпывает содержание вопроса. Студент демонстрирует как знание, так и понимание вопросов билета и дополнительных вопросов экзаменатора. Оценка «хорошо» - содержание ответа в основных чертах отражает содержание вопроса. Студент демонстрирует как знание, так и понимание вопроса, но испытывает незначительные проблемы при ответах на дополнительные вопросы. Оценка «удовлетворительно» - содержание ответа в основных чертах отражает содержание вопроса, но допускаются ошибки. Не все положения ответа раскрыты полностью. Имеются фактические пробелы и не полное владение литературой. Оценка «неудовлетворительно» - содержание ответа не отражает содержание вопроса. Имеются грубые ошибки, а также незнание ключевых определений и литературы. Ответ на вопросы не носит развернутого изложения темы.

Защита курсового проекта 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. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учебное пособие. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 480 с. - Текст: электронный. - URL: <https://e.lanbook.com/book/167773>.

2. Ефимов И. Е., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники: учебник. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 384 с. - Текст : электронный. - URL: <https://e.lanbook.com/book/167727>.

3. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986.

4. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. М.: Высшая школа, 1984.

5. Коледов Л.А. Технология и конструирование микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989.

6. Технология СБИС. Под ред. С. Зи М.: Мир. 1983.

7. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987.

8. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1992.

9. Ситников А.В., Бабкина И.В. Диффузионные процессы в технологии изготовления полупроводниковых приборов. Эл. изд., 2012.

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.

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Лекционная аудитория, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой. Учебная лаборатория «Физических свойств твердых тел» и компьютерный класс.

Лабораторное оборудование: осциллограф С1-68 (С1-65), генератор ГЗ-34 (ГЗ-35), мост постоянного тока МО-61, вольтметр ВК2-20, универсальный вольтметр В7-16, универсальный источник питания, магазин сопротивлений, вольтметр В7-23, источник постоянного напряжения, электрическая печь, мост переменного тока Р5079.

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

По дисциплине «Технология изделий электронной техники» читаются лекции, проводятся практические занятия и лабораторные работы, выполняется курсовой проект.

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 технологических параметров изготовления приборов микро- и наносистемной техники. 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 курсового проекта изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсового проекта должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсового проекта, защитой курсового проекта.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать 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 занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом 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 усвоения 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 начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед 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
----------	-----------------------------	----------------------------	--