

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»



Декан ФРТЭ В.А.Небольсин

«21» декабря 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

«Технология производства микро и наносистемной техники»

Направление подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Профиль Компоненты микро- и наносистемной техники

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2022

Автор программы

/Ситников А.В./

И.о. заведующего кафедрой  
Физики твердого тела

/Калинин Ю.Е./

Руководитель ОПОП

/Стогней О.В./

Воронеж 2021

# 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

## 1.1. Цели дисциплины

Формирование у студентов знаний в области способов нанесения, удаления и модифицирования вещества на микро- и наноуровне, используемых при создании компонентов твердотельной электроники и интегральных микросхем.

## 1.2. Задачи освоения дисциплины

Изучение базовых процессов и оборудования, используемых в традиционной микротехнологии, а также специфические процессы, позволяющие формировать структуры на молекулярном уровне и основанные на способности к самоорганизации, селективности, анизотропии и «принципе матрицы».

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Технология производства микро и наносистемной техники» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений блока Б1.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Технология производства микро и наносистемной техники» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-2 - Способен проводить испытания изделий «система в корпусе» на устойчивость к внешним воздействующим факторам.

ПК-3 - Способен участвовать в исследованиях, направленных на разработку топологии монолитных интегральных схем, знаком с топологическими принципами построения интегральных схем.

ПК-5 - Способен исследовать, анализировать и прогнозировать влияние различных факторов на параметры наногетероструктурных объектов и изделий.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-2	Знать - физико-технологические и экономические ограничения миниатюризации и интеграции.
	Уметь - выбирать оптимальные технологические процессы, их последовательности и контрольно-измерительные операции для производства изделий нано- и микросистем.
	Владеть - методами расчета критических параметров технологических параметров влияющих на надежность компонентов нано- и микросистемной техники.
ПК-3	Знать

	- принципы организации базовых технологических процессов создания компонентов нано- и микросистемной техники.
	<b>Уметь</b> - выбирать производственное оборудование для выполнения технологических операций.
	<b>Владеть</b> - принципами проектирования технологических операций изготовления устройств нано- и микросистемной техники.
ПК-5	<b>Знать</b> - современные операции микро- и нанотехнологии; - принципы работы технологического оборудования, используемого в производстве материалов и компонентов нано- и микросистемной техники.
	<b>Уметь</b> -рассчитывать параметры технологических процессов создания компонентов нано- и микросистемной техники
	<b>Владеть</b> - навыками реализации современных способов нанесения, удаления и модифицирования материалов при создании элементной базы микро- и наносистем

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Технология производства микро и наносистемной техники» составляет 8 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры	
		6	7
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	144	72	72
В том числе:			
Лекции	72	36	36
Практические занятия (ПЗ)	72	36	36
<b>Самостоятельная работа</b>	72	36	36
<b>Курсовой проект</b>	+	+	
Часы на контроль	72	36	36
Виды промежуточной аттестации - экзамен	+	+	+
Общая трудоемкость:			
академические часы	288	144	144
зач.ед.	8	4	4

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий**

**очная форма обучения**

№	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак	СРС	Всего,
---	-------------------	--------------------	------	------	-----	--------

п/п				зан.		час
1	<b>Введение. Механическая и физико-химическая обработка поверхности.</b>	Введение. Предмет и задачи дисциплины. Основные тенденции развития полупроводникового приборостроения и микроэлектроники. 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.	8	8	8	24
2	<b>Химическая, электрохимическая, ионно-плазменная и плазмохимическая обработка материалов.</b>	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.	8	8	8	24
3	<b>Литографические способы обработки поверхности технологических слоев.</b>	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.	8	8	8	24
4	<b>Эпитаксиальные структуры.</b>	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.	8	8	8	24
5	<b>Диффузионное и ионное легирование.</b>	Место диффузионных процессов в полупроводниковой технологии. Кинетика процесса диффузии. Механизмы диффузии. Математические основы процесса диффузии. Особенности диффузии примесей в кремнии и арсениде галлия. Эффекты размерного несоответствия атомов примесей и атомов матричной решетки полупроводника. Механические напряжения и дефекты размерного несоответствия. Технологические разновидности диффузионного легирования. Методы локализации диффузии. Аппаратурное оформление процесса диффузии. 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.	8	8	8	24
6	<b>Методы стабилизации и защиты поверхности</b>	Характеристика поверхности полупроводника. Стабилизация поверхности методом поверхностных окислительно-восстановительных реакций. Защита поверхности кремния окислением. Структура и свойства стеклообразного диоксида	8	8	8	24

		кремния. Кинетика и механизмы окисления в различных средах.				
7	<b>Контактные системы и методы получения контактной разводки.</b>	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.	8	8	8	24
8	<b>Методы изоляции элементов ИМС и пассивные элементы интегральных микросхем.</b>	Методы создания внутрисхемной электрической изоляции полупроводниковых ИМС. Изоляция с помощью обратно смещенных диффузионных р-р-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.	8	8	8	24
9	<b>Основные типовые конструкции полупроводниковых приборов и ИМС.</b>	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.	8	8	8	24
<b>Итого</b>			<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>216</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом

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

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсового проекта в 6 семестре для очной формы обучения.

Примерная тематика курсового проекта: «Разработка технологии формирования биполярной ИМС с диэлектрической изоляцией»

Задачи, решаемые при выполнении курсового проекта:

- Ознакомление с принципами работы различных устройств электронной техники.
- Выявление топологических особенностей конструкций устройств электронной техники.
- Разработка технологии изготовления различных устройств электронной техники.

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-2	Знать физико-технологические и экономические ограничения миниатюризации и интеграции	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 выбирать оптимальные технологические процессы, их последовательности и контрольно-измерительные операции для производства изделий нано- и микросистем	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть методами расчета критических параметров технологических параметров влияющих на надежность компонентов нано- и микросистемной техники.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ПК-3	Знать принципы организации базовых технологических процессов создания компонентов нано- и микросистемной техники.	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 выбирать производственное оборудование для выполнения технологических операций.	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть принципами проектирования технологических операций изготовления устройств нано- и микросистемной техники.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ПК-5	Знать современные операции микро- и нанотехнологии, принципы работы технологического оборудования, используемого в производстве материалов и компонентов нано- и микросистемной техники.	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 рассчитывать параметры технологических процессов создания компонентов нано- и микросистемной 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 реализации современных способов нанесения, удаления и модифицирования материалов при создании элементной базы микро- и	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта.	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 6, 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-2	Знать физико-технологические и экономические ограничения миниатюризации и интеграции	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	Уметь выбирать оптимальные технологические процессы, их последовательности и контрольно-измерительные операции для производства изделий нано- и микросистем	Решение стандартных практически задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	Владеть методами расчета критических параметров технологических параметров влияющих на надежность компонентов нано- и микросистемной техники.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-3	Знать принципы организации базовых технологических процессов создания компонентов нано- и микросистемной техники.	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	Уметь выбирать производственное оборудование для выполнения технологических операций.	Решение стандартных практически задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	Владеть принципами проектирования технологических операций изготовления устройств нано- и микросистемной техники.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные	Продемонстрирован верный ход решения, но не	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

			ответы	получен верный ответ во всех задачах		
ПК-5	Знать современные операции микро- и нанотехнологии, принципы работы технологического оборудования, используемого в производстве материалов и компонентов нано- и микросистемной техники.	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	Уметь рассчитывать параметры технологических процессов создания компонентов нано- и микросистемной техники	Решение стандартных практически задач	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
	Владеть навыками реализации современных способов нанесения, удаления и модифицирования материалов при создании элементной базы микро- и наносистем	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

## 7.2 Примерный перечень оценочных средств (типичные 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) Иод
- d) Бор

Правильный ответ a).

3. Применение какого метода обеспесивает лучшую очистку

поверхности для молекулярно-лучевой эпитаксии?

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

б) Высокотемпературный отжиг?

Правильный ответ а).

4. Какой из методов окисления применяется наиболее часто?

а) Термическое окисление

б) Осаждение  $\text{SiO}_2$  из газовой фазы.

Правильный ответ а).

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

а) 300-700 С

б) 700-1300 С

с) 900-1100 С

Правильный ответ б)

6. Для чего формируют скрытый  $n^+$ -слой в при производстве биполярных ИС?

а) 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 каких статистических распределений описывается профиль распределения легирующей примеси при ионной имплантации?

а) Распределение Стюдента

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) 9-12 мкм

д) Без ограничений

Правильный ответ б).

9. По какому механизму диффундируют В и Р?

а) Диссоциативному

б) Междоузельному

с) Вакансионному

д) Краудионный

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 p-n-перехода в случае двухстадийной диффузии фосфора в кремний с электропроводностью p-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 p-n-перехода.

1. 4,35 мкм
2. 5,5 мкм
3. 2,5 мкм

3. Рассчитать профиль распределения концентрации примеси в n-p-n-структуре, полученной последовательной диффузией бора и фосфора в кремний с электропроводностью n-типа и удельным сопротивлением 0,15 Ом·см и 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 p-типа и удельным сопротивлением 1 Ом см, если распределение должно обладать глубиной залегания p-n-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.  $1070^\circ\text{C}$ ;  $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$
2.  $1170^\circ\text{C}$ ;  $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$
3.  $1070^\circ\text{C}$ ;  $5,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

5. Определить режим диффузии, проводимой в одну стадию при постоянной поверхностной концентрации, если распределение должно обладать глубиной залегания p-n-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 p-типа и удельным сопротивлением 1 Ом см.

1.  $1080^\circ\text{C}$ ;
2.  $1180^\circ\text{C}$ ;
3.  $1050^\circ\text{C}$ ;

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

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:  $C_B = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $x_{j\beta}=1,2 \text{ мкм}$ ,  $x_{jK}=3,5 \text{ мкм}$ ,  $C_{0a} = 3,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $C_{0d} = 1,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ .

1.  $T_{a1}=1060^\circ\text{C}$ ,  $t_{a1}=10 \text{ мин}$ ,  $N_a=5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{a2}=1150^\circ\text{C}$ ,  $t_{a2}=170 \text{ мин}$
2.  $T_{a1}=1060^\circ\text{C}$ ,  $t_{a1}=20 \text{ мин}$ ,  $N_a=5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{a2}=1150^\circ\text{C}$ ,  $t_{a2}=170 \text{ мин}$
3.  $T_{a1}=1060^\circ\text{C}$ ,  $t_{a1}=10 \text{ мин}$ ,  $N_a=5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{a2}=1150^\circ\text{C}$ ,  $t_{a2}=70 \text{ мин}$

### 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  $C_B = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $x_{j\beta}=1 \text{ мкм}$ ,  $x_{jK} = 2 \text{ мкм}$ ,  $C_{0a} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $C_{0d} = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

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 мкм
2. 1,5 мкм
3. 1 мкм

3. Рассчитать  $R_p$  и  $\Delta R_p$  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  $C_B=10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_a=100 \text{ кэВ}$ ,  $N_a=5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $E_d = 200 \text{ кэВ}$ ,  $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

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.  $E = 57 \text{ кэВ}$

7. Определить энергию ионов и дозу облучения, необходимые для создания р-п-перехода на глубине  $x_j = 0,3 \text{ мкм}$  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.  $E = 110 \text{ кэВ}$ ,  $N = 4,75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$
2.  $E = 100 \text{ кэВ}$ ,  $N = 3,75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$
3.  $E = 150 \text{ кэВ}$ ,  $N = 5,75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

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

1.  $E_a = 40 \text{ кэВ}$ ,  $E_d = 80 \text{ кэВ}$ ,  $N_a = 4,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_d = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$
2.  $E_a = 60 \text{ кэВ}$ ,  $E_d = 40 \text{ кэВ}$ ,  $N_a = 4,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_d = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$
3.  $E_a = 20 \text{ кэВ}$ ,  $E_d = 100 \text{ кэВ}$ ,  $N_a = 4,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_d = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

#### 7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом

#### 7.2.5 Примерный перечень заданий для подготовки к экзамену

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 теххимических 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, электролитографии
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.

### 7.2.6. 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. Экзамен.

### 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-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.
2	Химическая, электрохимическая, ионно-плазменная и плазмохимическая обработка материалов.	ПК-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.
3	Литографические способы обработки поверхности технологических слоев.	ПК-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.
4	Эпитаксиальные структуры.	ПК-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.
5	Диффузионное и ионное легирование.	ПК-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.
6	Методы стабилизации и защиты поверхности	ПК-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.
7	Контактные системы и методы получения контактной разводки.	ПК-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.

8	Методы изоляции элементов ИМС и пассивные элементы интегральных микросхем.	ПК-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.
9	Основные типовые конструкции полупроводниковых приборов и ИМС.	ПК-2, ПК-3, ПК-5	Тест, контрольная работа, защита курсового проекта, решение практических задач.

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

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

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

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

Защита курсовой работы, курсового проекта или отчета по всем видам практик 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. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986.

2. Ефимов И.Е., Козырь И.Я. Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк. 1986. 464 с.

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

4. Чистяков Ю.Д., Райнова Ю.П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. М.: Металлургия, 1979.

5. Черняев В.Н. Физико-химические основы технологии РЭА. М.:

Высшая школа, 1987.

6. Парфенов С.Д. Технология микросхем. М.: Высшая школы, 1986.

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

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

9. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. °М.: Высшая школа, 1987.

10. Кремневые планарные транзисторы. /Под ред. Я.А. Федотова М.: Сов. Радио. 1973, 335 с.

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

12. Плазменная технология в производстве СБИС. / Под редакцией П. Айнспурка, Д. Брауна, пер. с англ. под ред. Е.С. Машковой. М.:Мир, 1987.

13. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация, пер с нем. под ред.. М.И. Гусева. М.: Наука, 1983.

14. Валиев К.А., Раков А.В. Физические основы субмикронной литографии. М.: -Радио и связь, 1985.

15. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы. Материалы. Приборы. Изготовление./Пер. с англ. под ред. М.В. Гальперина:» М.: Мир, 1988.

16. Сугано Т., Икомо Т., Такзиси Е. Введение в микроэлектронику. -М.: МИР, 1989.

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

**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**

1. Учебные аудитории: 226/1, 221/1

2. Дисплейный класс, оснащенный компьютерными программами и проекторами.

3. Натурные лекционные демонстрации: демонстрации изделий электроники и микроэлектроники: дискретных приборов, интегральных микросхем; образцов полупроводниковых материалов, подложек микросхем, фотошаблонов и др

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

По дисциплине «Технология производства микро и наносистемной

техники».

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.

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.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: <ul style="list-style-type: none"><li>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;</li><li>- выполнение домашних заданий и расчетов;</li><li>- работа над темами для самостоятельного изучения;</li><li>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</li><li>- подготовка к промежуточной аттестации.</li></ul>
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, экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.