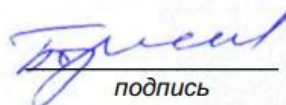


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
физики полупроводников и микроэлектроники



(Бормонтов Е.Н.)
расшифровка подписи

31.08.2024

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
по учебной дисциплине

Б1.В.02 Основы технологии электронной компонентной базы

Код и наименование направления подготовки/специальности: **11.03.04**

_____ Электроника и наноэлектроника _____

Направленность (профиль) подготовки/специализация: _____
Интегральная электроника и наноэлектроника

Квалификация выпускника: _____ бакалавр _____

Форма обучения: _____ очная _____

Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: _____
физики полупроводников и микроэлектроники

Составители рабочей программы дисциплины, в том числе фонда оценочных средств по учебной дисциплине: Машкина Екатерина Сергеевна, кандидат физико-математических наук, доцент

Учебный год
освоения дисциплины: 2024-2025

Семестр(ы): 6, 7

Освоение данной дисциплины направлено на формирование следующих компетенций

| Компетенции | | Индикаторы | | Планируемые результаты обучения |
|-------------|---|------------|---|--|
| Код | Наименование компетенции | Код(ы) | Наименование индикатора(ов) | |
| ПК-3 | Способен выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники | ПК-3.2 | Определяет состав средств технологического оснащения для разрабатываемых процессов производства изделий микроэлектроники | <p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - базовые технологические процессы производства изделий микроэлектроники; - основное технологическое оборудование и принципы его работы <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - работать с технологической документацией на изготовление изделий микроэлектроники |
| | | ПВ-3.3 | Составляет технологический маршрут, разрабатывает порядок пооперационного выполнения работ и оформляет маршрутные карты изготовления изделий микроэлектроники | |
| ПК-4 | Готов организовать метрологическое обеспечение производства материалов и изделий электронной техники | ПК-4.3 | Готовит предложения по повышению точности технологических операций, предупреждению и устранению брака при изготовлении изделий микроэлектроники | <p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - основные параметры технологических процессов <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - измерять, рассчитывать, контролировать основные параметры технологических операций |
| ПК-7 | Способен проводить технологические процессы производства материалов и изделий электронной техники | ПК-7.1 | Выбирает необходимые параметры технологических процессов производства изделий микроэлектроники | <p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - параметры технологических процессов изготовления изделий микро- и нанoeлектроники; <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - разрабатывать физические и математические модели технологических процессов производства приборов и устройств микро- и нанoeлектроники в соответствии с технологической документацией; - выбирать необходимые параметры технологических процессов производства изделий микро- |

| | | | | |
|--|--|--------|--|---|
| | | | | <p>электроники; <i>Владеть:</i> - методами расчета режимов и параметров технологических процессов изготовления элементов микроэлектроники в соответствии с технологической документацией</p> |
| | | ПК-7.2 | <p>Осуществляет эксплуатацию технологического оборудования и технологической оснастки на производстве изделий микроэлектроники</p> | <p><i>знать:</i> - основные параметры технологических процессов; - основное технологическое оборудование производства изделий микроэлектроники и принципы его работы; - правила эксплуатации технологического оборудования. <i>уметь:</i> измерять, рассчитывать, контролировать основные параметры технологических операций <i>владеть:</i> методами расчета технологических и электрических параметров компонентов и устройств электроники и наноэлектроники</p> |
| | | ПК-7.3 | <p>Решает технологические проблемы, возникающие в процессе производства изделий микроэлектроники</p> | <p><i>Знать:</i> - процесс производства изделий микроэлектроники; <i>Уметь:</i> - решать технологические проблемы, возникающие в процессе производства изделий микроэлектроники <i>Владеть:</i> - методами расчетов режимов и параметров технологических процессов производства микроэлектроники; - методами математического моделирования технологических процессов с целью оптимизации параметров изделий микроэлектроники низкой и средней сложности</p> |

Перечень заданий для оценки уровня освоения дисциплины:

2) задания с коротким ответом:

1. Классифицировать основные этапы технологии изготовления интегральных микросхем.
(Ответ: подготовительный процесс, групповой процесс, индивидуальная обработка)
2. Перечислить основные технологические процессы производства ИМС на подготовительном этапе.
(Ответ: проектирование ИС, изготовление фотошаблонов, обработка пластин (шлифование, полирование))
3. Перечислить основные технологические процессы производства ИМС на групповом этапе.
(Ответ: эпитаксия, окисление, травление, диффузия/ионная имплантация, фотолитография, металлизация)
4. Перечислить основные технологические процессы производства ИМС на этапе индивидуальной обработки.
(Ответ: разделение пластин на кристаллы, монтаж кристаллов в корпусе, пайка выводов, герметизация, контроль и маркировка)
5. Перечислить основные материалы, используемые в производстве полупроводниковых приборов и ИС.
(Ответ: полупроводники Si, Ge, GaAs, InSb, GaSb; диэлектрики кварц, LiNbO₃, BaTiO₃, сапфир)
6. Перечислить вспомогательные материалы, используемые в производстве полупроводниковых приборов и ИС.
(Ответ: технологические: легирующие примеси –III группа (B, Ga, Al, In), V группа (P, Sb, As, Bi); материалы электродов (Al, Cu, Au); изолирующие материалы (керамика, стекла); материалы корпуса (металлы, пластик); вспомогательные – кислоты, щелочи, деионизованная вода)
7. Основная техническая документация, используемая при производстве ИМС.
(Ответ: маршрутная карта, операционная карта, карта эскизов и схем, ведомость материальная, ведомость оснастки, спецификация технологических документов)
8. Требования, предъявляемые к чистым комнатам в производстве ИМС
(Ответ: 3 класс чистоты помещений, температура воздуха летом $+23\pm 1$ С, зимой $+21\pm 1$ С, относительная влажность воздуха 45 ± 15 %)
9. Классификация ИС по степени интеграции
(Ответ: мало-масштабная интегральная схема (мис) - до 10 элементов, средне-масштабная (сис) 10-100 элементов, большая интегральная схема (БИС) - 100-1000 элементов, сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) – от 1000 до 1 млн. элементов, ультрабольшие (УБИС) – от 1 млн. до 1 млрд. элементов, гигантские (ГБИС) – свыше 1 млрд. элементов)
10. Перечислить методы исследования структурных нарушений полупроводниковых материалов при механической обработке
(Ответ: метод косоугольного шлифа, метод шарового шлифа)
11. Перечислить способы травления материалов в производстве ИС.

(Ответ: жидкостное травление, сухое газовое травление)

12. Перечислить способы и методы проведения диффузионных процессов и основные технологические параметры

(Ответ: способы – диффузия из газовой и паровой фазы, диффузия из поверхностных источников; методы – метод открытой трубы, бокс-метод; основные контролируемые параметры – концентрация вводимой легирующей примеси, температура процесса, время процесса)

13. Назовите основные технологические параметры процесса ионной имплантации

(Ответ: энергия ионов, доза имплантации, время имплантации, температура отжига)

14. Перечислить способы нанесения резистивных пленок и способы экспонирования на этапе фотолитографии

(Ответ: способы нанесения – центрифугирование и пульверизация, способы экспонирования – контактная литография и проекционная литография)

15. Назовите методы нанесения металлических пленок в технологии ИС

(Ответ: вакуумное напыление, катодное распыление, ионно-плазменное распыление, магнетронное напыление)

16. Перечислить основные монтажно-сборочные операции в производстве ИС

(Ответ: совмещение кристалла и основания на рабочей позиции; крепление кристалла на держателе; соединение контактных площадок с выводами корпуса, герметизация корпуса ИС)

17. Назовите основные механизмы диффузии примеси в кремнии

(Ответ: междоузельный, вакансионный)

18. От каких параметров зависит коэффициент диффузии

(Ответ: температура, частотный фактор, энергия активации примеси)

19. Перечислите основные легирующие элементы для кремния

(B, Al, In, Ga – p-тип проводимости, P, As, Sb – n-тип проводимости)

20. Математическая модель стадии загонки примеси

(Ответ: диффузия из источника с постоянной концентрацией)

21. Математическая модель стадии разгонки примеси

(Ответ: диффузия из ограниченного источника)

6. Назовите какие существуют пробеги ионов в твердом теле при ионной имплантации

(Ответ: траекторный пробег (\check{R}), полный пробег (R), средний нормальный пробег (R_p), среднеквадратичное отклонение от нормального пробега (ΔR_p))

22. Виды распределения ионно-имплантированных примесей

(Ответ: неусеченная гауссиана – $R_p \geq 3\Delta R_p$, усеченная гауссиана - $R_p < 3\Delta R_p$)

3) расчетные задачи:

1. Рассчитать коэффициент диффузии бора в кремнии при $T=1000$ °С, если частотный фактор $D_0=2.5$ см²/с, энергия активации $\Delta E=3.51$ эВ

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) = 2.5 \exp\left(-\frac{3.51}{8.62 \cdot 10^{-5} \cdot 1273}\right) = 3.2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$$

2. Рассчитать коэффициент диффузии фосфора в кремнии при $T=1000$ °С, если частотный фактор $D_0=1.2 \cdot 10^{-3}$ см²/с, энергия активации $\Delta E=2.5$ эВ

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) = 1.2 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{2.5}{8.62 \cdot 10^{-5} \cdot 1273}\right) = 1.5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$$

3. В пластину кремния, равномерно легированную донорной примесью с исходной концентрацией $4 \cdot 10^{17}$ см⁻³, проводится диффузия бора из стекловидного источника с постоянной поверхностной концентрацией $C_s=10^{21}$ см⁻³ при температуре 1000 К в течение 10 минут. Найти поток диффузанта через поверхность $x=0$, количество вещества, поступившего в кремний за время диффузии и глубину р-п перехода.

Решение

Находим значение коэффициента диффузии бора при $T=1000$ К, используя аррениусову формулу с частотным фактором и энергией активации,:

$$D(1000) = 2.5 \exp\left(-\frac{3.51}{8.62 \cdot 10^{-5} \cdot 1000}\right) = 5.2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{с},$$

Глубина залегания р-п перехода x_j :

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{C_{\text{исх}}}{C_s}\right), \quad \text{где} \quad \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{C_{\text{исх}}}{C_s}\right) = z,$$

Следовательно при $\operatorname{erfc}z = \frac{4 \cdot 10^{17}}{10^{21}} = 0.0004$ $z = 2.5$, тогда

$$x_j = 2.5 \cdot 2\sqrt{5.2 \cdot 10^{-17} \cdot 600} = 8.83 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 8.83 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}$$

Скорость потока диффузии равна:

$$J(t) = C_s \sqrt{\frac{D}{\pi}} = 10^{21} \sqrt{\frac{5.2 \cdot 10^{-17}}{3.14 \cdot 600}} = 1.66 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}/\text{с}.$$

Количество вещества Q , поступившее в кремний в течение 10 минут:

$$Q = 2C_s \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} = 2 \cdot 10^{21} \sqrt{\frac{5.2 \cdot 10^{-17} \cdot 600}{3.14}} = 1.99 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}.$$

4. Рассчитать давление насыщенных паров при термическом испарении серебра при температуре 1320 К.

Решение.

Давление насыщенных паров рассчитывается по формуле:

$$\lg p_s = A - \frac{B}{T_u},$$

где p_s – давление насыщенного пара, Па;

A, B – постоянные, приведенные в приложении 3.

Для расчета p_s запишем

$$p_s = 10^{\left(\frac{A-B}{T_u}\right)}$$

$$\text{Тогда } p_s = 10^{\left(10,78 - \frac{14090}{1320}\right)} = 1,28 \text{ Па}$$

Ответ: $p_s = 1,28 \text{ Па}$

5. Рассчитать разброс толщины пленки на стандартной подложке при следующих условиях: испаритель – поверхностный; расстояние $h = 10 \text{ см}$.

Использовать стандартную подложку с размерами $60 \times 48 \text{ мм}$, т.е. $x = 30 \text{ мм}$, $y = 24 \text{ мм}$.

Решение. Воспользуемся формулой:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^2},$$

где d, d_0 – толщина пленки соответственно в произвольной точке и в центре подложки.

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{3^2}{10^2} + \frac{2,4^2}{10^2}\right)^2} = \frac{1}{(1 + 0,09 + 0,0576)^2} = 0,76$$

Таким образом, толщина на краю подложки составляет 76% от толщины в центре подложки. Разброс составляет $(1 - 0,76) = 0,24$

Ответ: 24%.

6. Рассчитать скорость распыления мишени из тантала ионами аргона с энергией 1 кэВ при плотности ионного тока 10 А/см^2 . Коэффициент распыления тантала – $S = 1,18 \text{ ат/ион}$.

Решение.

Скорость распыления рассчитывается по формуле

$$V_p = \frac{N_u \cdot S}{N_0},$$

где N_u – число ионов, падающих на единицу площади в единицу времени.

Величина N_u зависит от плотности ионного тока j , на мишени.

$$N_u = \frac{j}{e},$$

где e – заряд электрона.

Атомная плотность мишени из тантала $N_0 = 5,52 \cdot 10^{28} \text{ ат/м}^3$.

Решение.

$$N_u = \frac{10}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{19} \text{ ион/м}^2 \cdot \text{с},$$

$$V_p = \frac{6,25 \cdot 10^{19} \cdot 1,18}{5,52 \cdot 10^{28}} = 1,34 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}.$$

Ответ: $V_p = 1,34 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}$

Критерии и шкалы оценивания:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

2) задания с коротким ответом:

- 2 балла – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ, в том числе частично.

3) расчетные задачи, ситуационные, практико-ориентированные задачи / мини-кейсы:

- 5 баллов – задача решена верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход решения);
- 2 балла – решение задачи содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода ее решения, или задача решена не полностью, но получены промежуточные результаты, отражающие правильность хода решения задачи, или, в случае если задание состоит из решения нескольких подзадач, 50% которых решены верно;
- 0 баллов – задача не решена или решение неверно (ход решения ошибочен или содержит грубые ошибки, значительно влияющие на дальнейшее изучение задачи).