

Инженерная академия

(факультет/институт/академия)

Рекомендовано МССН

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины \_\_\_\_\_ Технология изготовления устройств нано- и  
микросистемной техники \_\_\_\_\_

Рекомендуется для направления подготовки/специальности

28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

(указываются код и наименование направления подготовки/специальности)

Направленность программы (профиль)

Инженерно-физические технологии в наноиндустрии (совместно с Евразийским  
национальным университетом им. Л.Н. Гумилева)

(наименование образовательной программы в соответствии с направленностью (профилем))

**1. Цели и задачи дисциплины:** Целью освоения дисциплины «Технология изготовления устройств нано- и микросистемной техники» является получение знаний, умений, навыков и опыта деятельности в области технологического технологических процессов планарной технологии; основных приемов формирования структур элементов интегральных схем; принципов действия технологического оборудования и режимов выполнения технологических операций. Теоретические, расчетные и практические положения дисциплины изучаются в процессе работы над лекционным курсом, при выполнении практических работ, и самостоятельной работе с учебной и технической литературой.

**2. Место дисциплины в структуре ОП ВО:**

Дисциплина «Технология изготовления устройств нано- и микросистемной техники» относится к вариативной части блока 1 учебного плана.

В таблице № 1 приведены предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций дисциплины в соответствии с матрицей компетенций ОП ВО.

Таблица № 1

**Предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций**

№ п/п	Шифр и наименование компетенции	Предшествующие дисциплины	Последующие дисциплины (группы дисциплин)
Общекультурные компетенции			
Общепрофессиональные компетенции			
Профессиональные компетенции (вид профессиональной деятельности научно-исследовательский)			
ПК-5	Способность разрабатывать технологии изготовления наноструктурированных покрытий с заданными свойствами и проводить исследования их характеристик	Электротехника; Электроника; Квантовая электроника Оптика и физика лазеров Физические основы микро- и нано электроники Основы наноустройств	Системы автоматизированного проектирования наноструктур и систем на их основе
ПК-7	Способность разрабатывать современные технологические процессы изготовления наноэлектронных изделий	Электротехника Электроника Квантовая электроника Оптика и физика лазеров	Системы автоматизированного проектирования наноструктур и систем на их основе
ПК-8	Способность разрабатывать новые технологические процессы производства микро- и наноразмерных электромеханических систем	Физические основы микро- и нано электроники Основы наноустройств	

**3. Требования к результатам освоения дисциплины:**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:  
 ПК-5 - Способность разрабатывать технологии изготовления наноструктурированных покрытий с заданными свойствами и проводить исследования их характеристик; ПК-7 - Способность разрабатывать современные технологические процессы изготовления нанoeлектронных изделий; ПК-8 - Способность разрабатывать новые технологические процессы производства микро- и наноразмерных электромеханических систем.

(указываются в соответствии с ОС ВО РУДН)

В результате изучения дисциплины студент должен:

**Знать:**

- современный уровень развития полупроводниковой технологии;
- основные технологические операции, режимы их проведения;
- методы контроля параметров получаемых изделий;
- схемы технологических установок;
- требования к используемым материалам.

**Уметь:**

- понимать информацию, которую содержат описания технологических процессов;
- выполнять оценки основных параметров технологического процесса;
- выполнять основные технологические операции.

**Владеть:** методами разработки схемы технологического процесса изготовления электронной схемы с заданными структурными элементами

**4. Объем дисциплины и виды учебной работы**

Общая трудоемкость дисциплины составляет **5 зач.ед. (180 ч.)**.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры			
		3	4		
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	51	27	24		
В том числе:	-	-	-	-	-
<i>Лекции</i>	34	18	16		
<i>Практические занятия (ПЗ)</i>	17	9	8		
<i>Семинары (С)</i>	-				
<i>Лабораторные работы (ЛР)</i>	-				
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	125	45	84		
Общая трудоемкость	час	180	72	108	
	зач. ед.	5	2	3	

**5. Содержание дисциплины**

**5.1. Содержание разделов дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела (темы) дисциплины	Содержание раздела (темы)
1	Понятие технологии микро- и нанoeлектронных схем	Основные технологические процессы. Планарная технология. Характеристика современной технологии ИМС
2	Подготовка полупроводниковых подложек	Ориентирование кристаллов. Механическая обработка;
3	Легирование полупроводниковых подложек	Диффузия примесей в полупроводник. Диффузия в потоке газа-носителя. Измерение параметров диффузионных слоев. Легирование полупроводников ионным внедрением. Радиационные эффекты в кремнии. Отжиг имплантированного кремния.

4	Нанесение пленок на поверхность подложек	Эпитаксиальное наращивание кремния. Хлоридный и гидридный методы эпитаксии. Молекулярно-лучевая эпитаксия кремния. Термическое окисление кремния. Вакуумное напыление. Схема вакуумной установки. Ионно-плазменное напыление тонких плёнок. Магнетронные системы напыления. Химическое осаждение тонких плёнок из газовой фазы.
5	Получение рисунка элементов интегральных схем	Ионно-плазменное травление. Фотолитография. Позитивные и негативные фоторезисты. Методы создания фотошаблонов. Электролитография. Особенности литографии нанометровых размеров.
6	Типовой технологический процесс	Изоляция элементов в интегральных микросхемах. Изоляция p-n переходом. Изоляция диэлектрическими плёнками. Локальное окисление. Типовой технологический процесс изготовления изопланарной биполярной СБИС. Типовой технологический процесс изготовления n-канальных МОП СБИС. Металлизация ИС. Разводка на основе плёнок алюминия. Сборка интегральных микросхем. Методы присоединения кристаллов. Метод термокомпрессии, ультразвуковой сварки.

### 5.2. Разделы дисциплин и виды занятий

	Наименование раздела дисциплины	Лекц.	Практ. зан.	Лаб. зан.	Семина	СРС	Всего час.
<i>3,4 семестр</i>							
1.	Понятие технологии микро- и нанoeлектронных схем	6	3	-	-	21	30
2.	Подготовка полупроводниковых подложек	6	3	-	-	20	29
3.	Легирование полупроводниковых подложек	5	3			21	29
4.	Нанесение пленок на поверхность подложек	6	3			21	30
5.	Получение рисунка элементов интегральных схем	5	3			21	29
6.	Типовой технологический процесс	6	2			21	29

(Содержание указывается в дидактических единицах. По усмотрению разработчиков материал может излагаться не в форме таблицы)

**6. Лабораторный практикум** не предусмотрен

**7. Практические занятия (семинары)**

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Тематика практических занятий	Трудоемкость (час.) ОФО
1.	2.	Анизотропное травление кремния	2
2.	3.	Расчет технологических режимов создания планарного п-р-п транзистора	3
3.	3.	Расчет параметров распределения примесей при ионном легировании	2
4.	4.	Расчет скорости роста эпитаксиальной пленки	2
5.	4.	Расчет однородности толщины напыляемой пленки	2
6.	5.	Получение рисунка элементов интегральных схем	3
7.	6.	Особенности типовых технологических процессов	3
	<b>Итого</b>		<b>17</b>

**8. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

Контрольные тесты, сценарии к проведению семинарских занятий, подбор задач для текущего контроля. Компьютерный класс, оснащенный видеопроектором.

**9. Информационное обеспечение дисциплины:**

Осуществление образовательного процесса по дисциплине базируется на использовании следующих информационных технологий:

1. ЭБС РУДН и сторонние ЭБС, к которым студенты университета имеют доступ на основании заключенных договоров:

- Электронно-библиотечная система РУДН – ЭБС РУДН

<http://lib.rudn.ru/MegaPro/Web>

- ЭБС «Университетская библиотека онлайн» <http://www.biblioclub.ru>

- ЭБС Юрайт <http://www.biblio-online.ru>

- ЭБС «Консультант студента» [www.studentlibrary.ru](http://www.studentlibrary.ru)

- ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com/>

2. Сайты министерств, ведомств, служб, производственных предприятий и компаний, деятельность которых является профильной для данной дисциплины:

- <https://www.mos.ru/mka/>

- <http://www.minstroyrf.ru/>

3. Базы данных и поисковые системы:

- электронный фонд правовой и нормативно-технической документации

<http://docs.cntd.ru/>

- поисковая система Яндекс <https://www.yandex.ru/>

- поисковая система Google <https://www.google.ru/>

- реферативная база данных SCOPUS

<http://www.elsevierscience.ru/products/scopus/>

## **10. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:**

### **а) основная литература:**

1. Кондрашин А.А., Лямин А.Н., Слещов В.В. Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств: Учеб. пособие. – М.: Техносфера, 2019. – 210 с.

2. K. Reinhardt, W. Kern. Handbook of silicon wafer cleaning technology. Thrid edition.2018. – 773 p

### **б) дополнительная литература:**

1. Мочалкина О.Р.;Березин А.С.

Технология и конструирование интегральных микросхем : Учеб. пособие для вузов, Березин А.С., Мочалкина О.Р., М., Радио и связь, 1992.

2. Курносов А.И.;Юдин В.В.

Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем : учеб. пособие для вузов, А. И. Курносов, В. В. Юдин, М., Высш.школа, 1986.

3. Таиров Ю.М.;Пичугин И.Г.

Технология полупроводниковых приборов : , И.Г. Пичугин; Учеб.пособие для вузов, М., Высш.школа, 1984.

## 11. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля):

### Вопросы для самопроверки и обсуждений по темам.

1. Какие законы распределения примеси в кремнии вам известны?
2. Как проводится диффузия из жидких диффузантов?
3. Почему газы разделяются на три потока при диффузии из  $PCl_3$ ?
4. Какими параметрами характеризуются диффузионные слои и как они определяются?
5. Каковы ограничения на параметры подложек и диффузионных слоев при использовании четырехзондового метода определения удельного поверхностного сопротивления слоя?
6. Каким источником примеси (бесконечным или ограниченным) является фосфоросиликатное стекло на поверхности кремниевой подложки?
7. В чем состоят преимущества и недостатки твердых и жидких источников диффузантов?
8. Какие факторы влияют на воспроизводимость удельного поверхностного сопротивления диффузионного слоя?
9. Какие факторы влияют на выбор состава газа-носителя в процессах окисления нитрида бора и диффузии бора в кремний?
10. Каково назначение пленок  $SiO_2$  в планарной технологии?
11. По каким законам происходит рост  $SiO_2$  (для "тонких" и "толстых" пленок)?
12. Каковы преимущества и недостатки окисления кремния в сухом и влажном кислороде, в парах воды, при нормальном и высоком давлении?
13. В чем заключается цветовой метод определения толщины  $SiO_2$ ?
14. В каких технологических процессах имеет значение гидрофильность (или гидрофобность) поверхности пленок  $SiO_2$ ?
15. В каких технологических операциях при создании интегральных микросхем применяется травление?
16. Какие травители являются изотропными, а какие анизотропными и почему?
17. Чем определяется скорость диффузии травителя и скорость химической реакции?
18. Каковы преимущества анизотропного травления?
19. Какая из главных кристаллографических плоскостей в кремнии травится с наибольшей скоростью в анизотропных травителях?
20. Какую форму имеют лунки при локальном анизотропном травлении по плоскости (100) для окон, имеющих круглую форму?

### Перечень вопросов итоговой аттестации по курсу

#### Вопросы на зачет:

1. Современное состояние технологии ИМС.
2. Планарная технология. Типовой технологический процесс планарно-эпитаксиального транзистора.
3. Кристаллическая структура полупроводников. Ориентация слитков.
4. Последовательность операций механической обработки.
5. Резка полупроводниковых слитков на пластины.
6. Абразивные материалы для обработки полупроводниковых пластин.
7. Шлифовка и полировка полупроводниковых подложек.
8. Методы разделения полупроводниковых пластин на кристаллы.
9. Технохимические процессы. Общие сведения.
10. Химическая очистка полупроводниковых подложек.
11. Вода в полупроводниковом производстве.
12. Назначение операций очистки полупроводниковых подложек.
13. Требования к реактивам, применяемым для очистки полупроводниковых пластин.

14. Последовательность операций очистки подложек после механической обработки.
15. Теоретическая модель химического травления кремния.
16. Полирующие и селективные травители. Анизотропное травление кремния.
17. Химико-динамическая обработка полупроводниковых подложек.
18. Газовое травление кремния.
19. Электрохимическая обработка полупроводниковых пластин.
20. Механизм диффузии примесей в кремнии.
21. Математические модели процессов диффузии. Распределение примесей.
22. Характеристики диффузантов.
23. Практические методы диффузии (жидкие, твердые, газообразные, пленкообразующие источники).
24. Локальная диффузия.
25. Дефекты, возникающие при диффузии.
26. Контроль параметров диффузионных слоев.
27. Метод ионной имплантации. Беспорядочный и каналированный пучок.
28. Средний нормальный пробег, среднеквадратичное отклонение, боковое рассеяние при ионной имплантации.
29. Распределение примесей при ионном легировании.
30. Схема ионно-лучевой установки.
31. Назначение блоков установки ионного легирования.
32. Вещества – источники ионов для внедрения в полупроводниковые подложки.
33. Достоинства ионного легирования. Применение ионного легирования в технологии ИМС.
34. Радиационные эффекты при ионном легировании (коэффициент использования примеси, доза аморфизации).
35. Отжиг дефектов, создаваемых при ионном легировании.
36. Импульсный отжиг полупроводниковых подложек.
37. Физические методы исследования ионно-легированных слоев.
38. Применение ионной имплантации в технологии ИМС.
39. Понятие эпитаксии, виды эпитаксии. Механизм газофазной эпитаксии.
40. Хлоридный метод газофазной эпитаксии. Газовая система.
41. Реакторы для газофазной эпитаксии.
42. Управление качеством и скоростью эпитаксии для газофазного процесса.
43. Легирование эпитаксиальных слоев при газофазной эпитаксии.
44. Распределение примесей на границе пленка-подложка при газофазной эпитаксии.
45. Эпитаксия на подложках со скрытыми слоями.
46. Силановый (гидридный) метод автоэпитаксии кремния.
47. Гетероэпитаксия кремния на сапфире. Характеристики используемых материалов.
48. Механизм осаждения гетероэпитаксиальных пленок кремния на сапфире. Дефекты пленок при гетероэпитаксии.
49. Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии.
50. Контроль параметров эпитаксиальных слоев.
51. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Достоинства, недостатки.
52. Методы легирования эпитаксиальных слоев при молекулярно-лучевой эпитаксии. Характеристики примесей. Коэффициент аккомодации.
53. Применение тонких пленок в микроэлектронике.
54. Термическое окисление кремния. Законы роста пленок  $\text{SiO}_2$ .



55. Окисление в сухом кислороде и в парах воды.
56. Термокомпрессионное окисление.
57. Заряд в пленках SiO<sub>2</sub>, образующийся при термическом окислении.
58. Окисление в галогеносодержащих средах.
59. Диэлектрические и маскирующие свойства пленок диоксида кремния.
60. Перераспределение примесей при термическом окислении кремния.

Коэффициент сегрегации

**12. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю):**

Материалы для оценки уровня освоения учебного материала дисциплины «Технология изготовления устройств нано- и микросистемной техники» (оценочные материалы), включающие в себя перечень компетенций с указанием этапов их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания, типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций, разработаны в полном объеме и доступны для обучающихся на странице дисциплины в ТУИС РУДН.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ВО РУДН.

**Разработчики:**

Ассистент,  
Кафедра «Нанотехнологии и микросистемная техника»  
должность, название кафедры

  
подпись

П.А.Михалев  
инициалы, фамилия

**Руководитель программы**  
Доцент,  
Кафедра «Нанотехнологии и микросистемная техника»  
должность, название кафедры

  
подпись

С.В.Агасиева  
инициалы, фамилия

**ИО заведующего кафедрой**  
Доцент,  
Кафедра «Нанотехнологии и микросистемная техника»  
должность, название кафедры

  
подпись

С.В.Агасиева  
инициалы, фамилия