

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета РТЭ _____ Небольсин В.А.

«30» августа 2017 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины

«Технологические системы в нанотехнологии»

Направление подготовки 28.03.02 Наноинженерия

Профиль Инженерные нанотехнологии в приборостроении

Квалификация выпускника Бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2017

Автор программы _____ /Липатов Г.И./

Заведующий кафедрой
Полупроводниковой электроники
и наноэлектроники _____ /Рембеза С.И./

Руководитель ОПОП _____ /Липатов Г.И./

Воронеж 2017

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цель изучения дисциплины

формирование у обучающихся знаний о технологических особенностях и технической реализации методов изготовления изделий микросистемной техники (МСТ).

1.2. Задачи освоения дисциплины

овладение базовыми технологическими операциями, маршрутами изготовления изделий микросистемной техники, принципами работы используемого технологического оборудования.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Технологические системы в нанотехнологии» относится к дисциплинам вариативной части блока Б1 учебного плана.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Технологические системы в нанотехнологии» направлен на формирование следующих компетенций:

ПКВ-2 — Готовность к применению современных технологических процессов и технологического оборудования в производстве приборов и устройств микро- и нанoeлектроники.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПКВ-2	Знает основные технологические процессы микро- и нанoeлектроники, принципы работы технологического оборудования, современные проблемы микро- и нанотехнологий.
	Умеет грамотно разрабатывать маршруты технологических процессов и обоснованно выбирать необходимое технологическое оборудование.
	Владеет методами анализа технологических процессов, навыками работы на технологическом оборудовании.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Основы производства изделий электронной техники» составляет 3 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий:

очная форма обучения

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
---------------------	-------------	----------

		3
Аудиторные занятия (всего)	36	36
В том числе:		
лекции	18	18
лабораторные работы	18	18
Самостоятельная работа	72	72
Виды промежуточной аттестации — зачет	+	+
Общая трудоемкость:		
академические часы	108	108
з.е.	3	3

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

очная форма обучения

№ п/п	Наименование раздела	Содержание раздела	Лекции	Лаб. раб.	СРС	Всего часов
1	Понятие о маршрутах технологических процессов производства изделий электронной техники и особенностях построения технологических систем для микроэлектроники	Понятие о маршрутах технологических процессов производства изделий электронной техники и особенностях построения технологических систем для микроэлектроники	2		6	8
2	Технологические системы механической обработки полупроводниковых материалов	Технологические системы механической обработки полупроводниковых материалов	2		6	8
3	Технологические системы химобработки, травления и очистки пластин	Технологические системы химобработки, травления и очистки пластин	2	4	8	14
4	Технологические системы легирования полупроводников	Технологические системы легирования полупроводников	2	4	8	14
5	Технологические системы химического осаждения слоев из газовой фазы	Технологические системы химического осаждения слоев из газовой фазы	2	6	10	18
6	Технологические системы нанесения тонких пленок	Технологические системы нанесения тонких пленок	2	4	8	14
7	Технологические системы плазмохимических процессов	Технологические системы плазмохимических процессов	2		8	10
8	Технологические системы литографических процессов	Технологические системы литографических процессов	2		8	10
9	Технологические системы микросварки и монтажа компонентов	Технологические системы микросварки и монтажа компонентов	2		10	12

Итого	18	18	72	108
--------------	-----------	-----------	-----------	------------

5.2 Перечень лабораторных работ

1. Изучение технологических систем химобработки, травления и очистки поверхности пластин
2. Изучение процесса химического осаждения кремния из газовой фазы
3. Изучение процесса вакуум-термического осаждения металлических слоев
4. Изучение технологических систем плазмохимической обработки

5.3 Перечень тем практических занятий

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает проведение практических занятий.

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

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

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
ПКВ-2	Знает основные технологические процессы микро- и нанoeлектроники, принципы работы технологического оборудования, современные проблемы микро- и нанотехнологий	Выполнение лабораторных работ	Выполнение заданий в срок, предусмотренный в рабочей программе	Невыполнение заданий в срок, предусмотренный в рабочей программе
	Умеет грамотно разрабатывать маршруты технологических процессов и обоснованно выбирать необходимое технологическое оборудование	Выполнение лабораторных работ	Выполнение заданий в срок, предусмотренный в рабочей программе	Невыполнение заданий в срок, предусмотренный в рабочей программе
	Владеет методами анализа технологических процессов, навыками ра-	Выполнение	Выполнение заданий в срок,	Невыполнение заданий в срок, преду-

боты на технологическом оборудовании	лабораторных работ	предусмотренный в рабочей программе	смотренный в рабочей программе
--------------------------------------	--------------------	-------------------------------------	--------------------------------

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 2-м семестре для очной формы обучения по двухбалльной системе:

«зачтен»;

«не зачтено».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ПКВ-2	Знает основные технологические процессы микро- и нанoeлектроники, принципы работы технологического оборудования, современные проблемы микро- и нанотехнологий	Тест	Выполнение теста на 70—100 %	Выполнение менее 70 %
	Умеет грамотно разрабатывать маршруты технологических процессов и обоснованно выбирать необходимое технологическое оборудование	Решение стандартных практических задач	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	Владеет методами анализа технологических процессов, навыками работы на технологическом оборудовании	Ответы на вопросы к зачету	Даны ответы на большинство заданных вопросов	Даны ответы менее чем на половину заданных вопросов

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. Процесс ионной имплантации в аморфном полупроводнике описывается с помощью распределения:

- а) Гаусса;
- б) двойного сопряженного распределения Гаусса (асимметричного);
- в) Гаусса с обобщенным экспоненциальным «хвостом»;
- г) Пирсон-IV;
- д) Пирсон-IV с линейно-экспоненциальным хвостом.

2. Наклон подложки относительно направления падения ионного пучка при проведении процесса ионной имплантации необходим для:

- а) предотвращения распыления материала с поверхности подложки;
- б) более равномерного распределения примеси в латеральном направле-

нии;

в) предотвращения явления каналирования ионов в монокристаллическом полупроводнике;

г) уменьшения нагрева поверхности подложки.

3. Количество введенной в полупроводник примеси в процессах диффузии и ионной имплантации характеризуется:

А) полным количеством атомов примеси;

Б) концентрацией примеси;

В) дозой примеси;

Г) дозой активной примеси.

4. При окислении кремния скорость протекания процесса определяется:

а) скоростью поставки окислителя к поверхности кремния;

б) скоростью диффузии окислителя в слое окисла по направлению к границе окисел—кремний;

в) скоростью протекания химической реакции на поверхности окисла;

г) скоростью протекания химической реакции на границе окисел—кремний.

5. При моделировании процесса окисления кремния учитываются:

а) зависимость скорости процесса от температуры;

б) зависимость скорости процесса от парциального давления компонентов окисляющей среды;

в) зависимость скорости процесса от ориентации подложки, механических напряжений и уровня легирования;

г) от всех перечисленных факторов.

6. Сегрегация примеси — это:

а) явление перераспределения примеси между окислом и полупроводником, происходящие при высокой температуре из-за различия растворимости и коэффициентов диффузии примеси в полупроводнике и окисле;

б) встраивание атомов примеси в кристаллическую решетку полупроводника;

в) обеднение примесью поверхности полупроводника, происходящие при его нагреве в инертной среде;

г) перераспределение примеси в объеме полупроводника при высокой температуре.

7. Какая из формул наиболее точно отражает кинетику процесса высокотемпературного термического окисления полупроводников в общем

виде (где x — толщина окисла, t — длительность процесса окисления, K_1 и K_2 — константы процесса):

а) $x=K_1t$; б) $x=K_1\ln(K_2t+1)$; в) $x^2=K_1t$; г) $x^{1/2}=K_1t$; д) $x^2/K_1+x/K_2=t$.

8. При диффузионном легировании кремния фосфором из POCl_3 важнейшими параметрами процесса являются:

а) температура кремниевых пластин, скорость потока диффузанта, длительность диффузии;

б) расход газа-носителя, температура кремниевых пластин, длительность диффузии;

в) температура источника POCl_3 , состав газа-носителя, температура кремниевых пластин;

г) концентрация POCl_3 и кислорода в газовой фазе, температура кремниевых пластин, длительность диффузии;

д) длительность диффузии, температура рабочей зоны печи, количество кремниевых пластин в кассете.

9. Какие операции процесса фотолитографии обеспечивают требуемую кислотостойкость фоторезистивной маски?

а) экспонирование фоторезиста;

б) предварительная сушка фоторезиста;

в) проявление фоторезиста;

г) задубливание фоторезиста.

10. Какой из ниже перечисленных типов испарителей целесообразнее использовать для испарения тугоплавких металлов:

а) взрывного типа;

б) лазерный;

в) прямонакальный резистивный;

г) тигельного типа.

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач (выполнения контрольной работы)

1. Рассчитать и построить распределение примеси при диффузии в пластину кремния КДБ-7,5 при температурах загонки и разгонки $T_1=1000$ °С и $T_2=1150$ °С в течение $t_1=20$ мин и $t_2=1,5$ ч соответственно.

2. Рассчитать и построить распределение примеси после легирования платины кремния марки КЭФ-5 бором с дозой 10^{12} см⁻² при энергии 100 кэВ и последующего отжига в течение 2 ч при 1000 °С.

3. Определить время напыления и разброс по толщине пленки, получаемой при вакуум-термическом напылении индия. Толщина пленки в центре

подложки должна быть 5 мкм. Испарение проводится из круглого тигля диаметром 50 мм на подложку диаметром 100 мм, расположенную осесимметрично на расстоянии $L=250$ мм от испарителя. Температура испарителя 925 °С, подложки — 125 °С.

4. Выбрать энергию As^+ и дозу облучения для формирования в n -Si с $N_{исх}=2 \cdot 10^{15}$ см⁻³ сильнолегированного заглабленного слоя n^+ -типа так, чтобы на глубине 0,35 мкм концентрация имплантированной примеси равнялась $N_{макс}=2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Рассчитать результирующую поверхностную концентрацию примеси.

5. Канал МОП-транзистора легируют бором до максимальной концентрации $8 \cdot 10^{16}$ см⁻³ на глубине 0,15 мкм. Найти энергию ионов, дозу легирования и разброс ΔR_p .

6. Рассчитать процесс двухстороннего нагрева пластины кремния диаметром 100 мм и толщиной 1 мм. Коэффициент теплоотдачи $\alpha=1100$ Дж/(м²·с·К), коэффициент теплопроводности кремния $\lambda=109$ Дж/(м·с·К), $T_0=20$ °С, $T_\infty=700$ °С.

7. Осаждение диоксида кремния за счет разложения ТЭОС происходит при температуре 700 °С со скоростью 9 нм/мин. При добавлении в реакционную смесь фосфорсодержащих легирующих добавок энергия активации реакции разложения ТЭОС уменьшается с 1,9 эВ до 1,4 эВ. Какова при этом скорость роста ФСС?

8. На кремниевой пластине термическим окислением получен слой SiO_2 толщиной 0,2 мкм. Какое дополнительное время потребуется, чтобы получить еще 0,1 мкм SiO_2 в сухом кислороде при 1200 °С?

9. Постройте профиль распределения легирующей примеси для отжига в течение 30 мин при температуре 850 °С ($D=5 \cdot 10^{-16}$ см²/с) после имплантации с дозой 10^{15} см⁻² и энергией 60 кэВ.

10. Рассчитать градиент концентрации примеси в p — n -переходе, полученном на глубине 10 мкм путем диффузии фосфора в КДБ-0,4 до поверхностной концентрации $N_0=3 \cdot 10^{20}$ см⁻³ при 1250 °С.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает проведение экзамена.

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

1. Что предполагает современный комплексный подход к организации и модернизации высокотехнологичных производств?

2. Из каких элементов состоит чистое помещение/чистая зона?

3. На сколько классов подразделяет чистые помещения набор стандартов ISO 14644? Дайте характеристику каждого из классов.

4. На какие основные типы подразделяют чистые помещения и зоны? Охарактеризуйте их.

5. Особенности полупроводникового производства и их влияние на конструкцию оборудования.

6. Основные стадии производства и классификация оборудования.

7. Тенденции в разработке оборудования полупроводникового производства.

8. Плазма и ее использование в ионно-плазменных процессах.

9. Средства получения вакуума. Вакуумная система и ее элементы.

10. Методы и способы нагрева деталей и материалов в оборудовании электронной промышленности. Конструкции тепловых узлов установок.

11. Оборудование для резки слитков и механической обработки пластин полупроводниковых материалов.

12. Оборудование для шлифования и полирования пластин.

13. Оборудование для очистки поверхностей полупроводниковых приборов.

14. Способы интенсификации процесса очистки.

15. Оборудование для химической обработки полупроводниковых пластин.

16. Оборудование для диффузии и окисления, химического осаждения из газовой фазы.

17. Оборудование для ионной имплантации.

18. Оборудование для осаждения пленок термическим испарением в вакууме.

19. Оборудование для магнетронного осаждения пленок.

20. Оборудование для процессов фотолитографии.

21. Монтажно-сборочное оборудование.

7.2.5 Примерный перечень вопросов к экзамену

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает проведение экзамена.

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Выставление оценки учебным планом не предусмотрено.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
-------	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------

1	Понятие о маршрутах технологических процессов производства изделий электронной техники и особенностях построения технологических систем для микроэлектроники	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач
2	Технологические системы механической обработки полупроводниковых материалов	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач
3	Технологические системы химической обработки, травления и очистки пластин	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач
4	Технологические системы легирования полупроводников	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач
5	Технологические системы химического осаждения слоев из газовой фазы	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач
6	Технологические системы нанесения тонких пленок	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач
7	Технологические системы плазмохимических процессов	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач
8	Технологические системы литографических процессов	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач
9	Технологические системы микросварки и монтажа компонентов	ПКВ-2	Тест, решение стандартных задач

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

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

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

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

8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Основная литература

Черняев В.М. Технология производства интегральных микросхем и мик-

ропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.

Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. — М.: Радио и связь, 1991. — 528 с.

Панфилов Ю.В. Оборудование производства интегральных микросхем и промышленные роботы / Ю.В. Панфилов, И.Т. Рябов, Ю.Б. Цветков. — М.: Радио и связь, 1988. — 320 с.

Блинов И.Г. Оборудование полупроводникового производства. — М.: Машиностроение, 1986. — 264 с.

Дополнительная литература

Липатов Г.И. Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.1. — Воронеж: ВГТУ, 2005. — 142 с.

Липатов Г.И. Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.2. — Воронеж: ВГТУ, 2006. — 172 с.

Липатов Г.И. Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.3. — Воронеж: ВГТУ, 2008. — 227 с.

Липатов Г.И. Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.4. — Воронеж: ГОУ ВПО «ВГТУ», 2010. — 173 с.

Методические разработки

Карты технологических маршрутов и паспорта на технологическое оборудование

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:

<http://perst.issp.ras.ru> — информационный бюллетень «Перспективные технологии»

<http://www.nanonewsnet.ru> — сайт аналитического агентства Nanotechnology News Network

<http://www.nanodigest.ru> — интернет-журнал о нанотехнологиях

<http://www.nano-info.ru> — сайт о современных достижениях в области микро- и нанотехнологий

<http://www.nanometer.ru> — сайт нанотехнологического сообщества ученых

<http://www.nano-portal.ru> — портал, посвященный теме развития нанотехнологий и их внедрения в производство

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Учебный компьютерный класс, оснащенный компьютерными програм-

мами для выполнения расчетов, и рабочими местами для самостоятельной подготовки обучающихся с выходом в Интернет.

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ) «Технологические системы в нанотехнологии»

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

Лабораторные занятия направлены на приобретение практических навыков расчета режимов и анализа выполнения базовых технологических операций производства изделий электронной техники. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой выполнения заданий на практических занятиях.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометить 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.
Лабораторное занятие	Лабораторные занятия позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции, при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности практических занятий, для подготовки к ним необходимо: разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Дни перед зачетом 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
1			
2			
3			