

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
 УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
 «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
 (ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

УТВЕРЖДАЮ»
 Председатель ученого совета ФРТЭ

_____ В.А. Небольсин

« ____ » _____ 2016 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ»

Закреплена за кафедрой: полупроводниковой электроники и наноэлектроники (ППЭНЭ)

Направление подготовки (специальности): 28.03.02 «Наноинженерия»

Профиль: «Инженерные нанотехнологии в приборостроении»

Часов по УП: 144 / **Часов по РПД:** 144

Часов по УП (без учета на экзамены): 108/ **Часов по РПД:** 108

Часов на самостоятельную работу по УП: 36 (25 %)

Часов на самостоятельную работу по РПД: 36 (25 %)

Общая трудоемкость в ЗЕТ: 4

Виды контроля в семестрах (на курсах): Экзамены 5; Зачеты —; Курсовые проекты —;
 Курсовые работы —.

Форма обучения: очная. **Срок обучения:** нормативный

Распределение часов дисциплины по семестрам

Вид занятий	№ семестров, число учебных недель в семестрах																		
	1/18		2/18		3/18		4/18		5/18		6/18		7/18		8/12		Итого		
	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	
Лекции									36	36								36	36
Лабораторные									36	36								36	36
Практические									—	—								—	—
Ауд. занятия									72	72								72	72
Сам. работа									36	36								36	36
Экзамен									36	36								36	36
Итого									144	144								144	144

Программа составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) — государственные требования к минимуму содержания и уровня подготовки бакалавра по направлению подготовки 28.03.02 «Наноинженерия». Утвержден приказом Министерства образования Российской Федерации от 3 декабря 2015 г. № 1414.

Программу составил канд. техн. наук, доцент

Г.И. Липатов

Рецензент: д-р техн. наук, профессор

С.А. Акулинин

Рабочая программа дисциплины составлена на основании учебного плана подготовки бакалавров по направлению 28.03.02 «Наноинженерия», профиль «Инженерные нанотехнологии в приборостроении».

Рабочая программа дисциплины рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ППЭНЭ.

Протокол № 5 от «14» января 2016 г.

Заведующий кафедрой ППЭНЭ

С.И. Рембеза

Рассмотрено и одобрено на заседании методической комиссии ФРТЭ.

Протокол № ___ от «22» января 2016 г.

Председатель методической комиссии ФРТЭ

А.Г. Москаленко

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1	Целью изучения дисциплины «Физико-химические основы нанотехнологии» является формирование у обучающихся знаний о назначении, физических принципах и методах выполнения основных процессов в микро- и нанотехнологии
1.2	Для достижения цели ставятся задачи приобретения студентами знаний:
1.2.1	об основных технологических процессах производства изделий микро- и нанoeлектроники
1.2.2	о выборе режимов проведения базовых технологических процессов
1.2.3	о методах выполнения базовых технологических процессов

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО

Цикл (раздел) ОПОП: базовая часть		Код дисциплины в УП: Б1.Б.16
2.1	Требования к предварительной подготовке обучающегося: Б1.Б.4 «Математика» Б1.Б.5 «Физика» Б1.Б.6 «Химия» Б1.В.ОД.6 «Методы математической физики» Б1.В.ОД.15 «Основы производства изделий электронной техники»	
2.2	Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее: Б1.Б.19 «Технологические системы в нанотехнологии» Б1.В.ОД.19 «Методы диагностики в нанотехнологиях» Б1.В.ОД.9 «Процессы получения наноматериалов и наносистем» Б1.В.ОД.10 «Микроэлектромеханические системы» Б1.В.ОД.13 «Технологическое оборудование в производстве изделий микро- и нанoeлектроники» Б1.В.ДВ.6.1 «Микро- и наносистемы на базе 3D технологий» Б1.В.ДВ.6.2 «Микрооптоэлектромеханические устройства»	

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Код и наименование компетенции	
ОПК-1	способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и экспериментального исследования;
ПК-2	готовность в составе коллектива исполнителей участвовать во внедрении результатов научно-технических и проектно-конструкторских разработок в реальный сектор экономики.

В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ ОБУЧАЮЩИЙСЯ ДОЛЖЕН

3.1	Знать: основные физико-химические процессы, лежащие в основе различных методов нанотехнологии: взаимодействие потока расплава с потоком газа и жидкости, приводящее к генерации наночастиц; взаимодействие потока жидких и твердых наночастиц с поверхностью подложки; адсорбция и десорбция кластеров и молекул; процессы под иглой спектрального туннельного микроскопа и атомного силового микроскопа; взаимодействие активных частиц плазмы с поверхностью подложки (ОПК-1)
3.2	Уметь: подбирать наноструктуры и методы их производства для реализации нанообъектов с

	заданными характеристиками под конкретные требования преобразования электрических, оптических, магнитных, тепловых и механических сигналов (ОПК-1)
3.3 Владеть:	теоретическими знаниями о явлениях при нагреве твердого тела и при взаимодействии пучков электронов и ионов и частиц плазмы электрических разрядов с поверхностью твердого тела для выбора методов очистки поверхности (ПК-2)

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость в часах					Всего часов
			Лекции	Практ. занятия	Лаб. работы	СРС	Экз.	
1	Требования к основным технологическим процессам и применяемому оборудованию	1, 2	4		—	2	—	6
2	Термическое окисление	3	2		4	2	—	8
3	Химическое осаждение слоев из газовой фазы	4—7	8		4	8	—	20
4	Осаждение тонких пленок в вакууме	8, 9	4		8	6	—	18
5	Процессы легирования	10—12	6		8	6	—	20
6	Литографические процессы	13, 14	4		—	4	—	8
7	Ионно-плазменные процессы	15—18	8		12	8	—	28
8	Подготовка к экзамену						36	36
Итого часов:			36		36	36	36	144

4.1 Лекции

Неделя семестра	Тема и содержание лекции	Объем часов
1 Требования к основным технологическим процессам и применяемому оборудованию		
1	Требования к основным технологическим процессам и применяемому оборудованию	2
2	Тенденции развития современной технологии микро- и нанoeлектроники	2
2 Термическое окисление		
3	Термическое окисление кремния	2
3 Химическое осаждение слоев из газовой фазы		
4	Общая характеристика процессов осаждения слоев из газовой фазы	2
5	Модели роста слоев при ХОГФ	2
6	Эпитаксиальное осаждение кремния	2
7	Атомно-слоевое осаждение	2
4 Осаждение тонких пленок в вакууме		
8	Вакуум-термическое осаждение тонких пленок	2
9	Осаждение тонких пленок с использованием магнетронного распыления	2
5 Процессы легирования		
10	Диффузионное легирование	2
11	Ионное легирование	2
12	Методы выполнения процессов легирования	2
6 Литографические процессы		
13	Сущность оптической литографии	2
14	Методы литографии высокого разрешения	2
7 Ионно-плазменные процессы		
15	Применение низкотемпературной газоразрядной плазмы для травления и	2

	очистки материалов	
16	Плазмохимическое травление неорганических материалов	2
17	Плазмохимическое травление органических материалов	2
18	Процессы глубокого реактивно-ионного травления	2
Итого часов:		36

4.2 Практические занятия — не предусмотрены

4.3 Лабораторные работы

Неделя семестра	Наименование лабораторной работы	Объем часов	Виды контроля	
2 Термическое окисление				
2	Исследование процесса термического окисления кремния	4	Про- верка отчета по ла- бора- торной работе	
3 Химическое осаждение слоев из газовой фазы				
4	Исследование процесса химического осаждения диоксида кремния	4		
3 Осаждение тонких пленок в вакууме				
6	Исследование процесса вакуум-термического напыления металла	4		
8	Исследование процесса магнетронного напыления металла	4		
4 Процессы легирования				
10	Исследование процесса диффузионного легирования кремния	4		
12	Исследование процесса ионного легирования кремния	4		
6 Ионно-плазменные процессы				
14	Изучение характеристик плазмы	4		
16	Исследование влияния загрузки на скорость плазмохимического травления кремния	4		
18	Оптимизация параметров процесса плазмохимического травления кремния	4		
Итого часов:		36		

4.4 Самостоятельная работа студента (СРС)

Неделя семестра	Содержание СРС	Виды контроля	Объем часов
3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17	Проработка материала лекций с использованием рекомендуемой литературы	Опрос	18
2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18	Подготовка к лабораторным работам	Ответы на контрольные вопросы	18
Итого:			36

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В рамках изучения дисциплины предусмотрены следующие образовательные технологии:	
5.1	Лекции
5.2	Лабораторные работы
5.3	Самостоятельная работа

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

6.1	Контрольные вопросы и задания
-----	-------------------------------

6.1.1	Для текущего контроля успеваемости используются контрольные вопросы, помещенные в конце каждой лабораторной работы
6.1.2	В качестве заданий предусмотрены выдаваемые для самостоятельного решения задачи
6.2	Темы письменных работ не предусмотрены
6.3	Другие виды контроля не предусмотрены

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1 Рекомендуемая литература				
№ п/п	Авторы/ составители	Заглавие	Вид и годы издания	Обеспеченность
7.1.1 Основная литература				
Л1.1	Марголин В.И., Жабреев В.А., Лукьянов Г.Н., Тупик В.А.	Введение в нанотехнологию: СПб.: Лань, 2012. 464 с.	Учеб. для вузов, 2012	1
Л1.2	Мальшева И.А.	Технология производства интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1991. 344 с.	Учеб. для вузов, 1991	
Л1.3	Черняев В.М.	Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.	Учеб. для вузов, 1987	1
7.1.2 Дополнительная литература				
Л2.1	Зи С.	Технология СБИС: В 2-х кн. М.: Мир, 1986. Кн.1. 404 с.; кн.2. 453 с.	Учеб. пособ., 1986	0,2
Л2.2	Готра З.Ю.	Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.	Справочник, 1991	1
Л2.3	Киреев В.Ю., Столяров А.А.	Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. М.: Техносфера, 2006. 192 с.	Учеб. пособ., 2006	0,33
Л2.4	Липатов Г.И.	Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.1. Воронеж: ВГТУ, 2005. 142 с.	Учеб. пособие, 2005	1
Л2.5	Липатов Г.И.	Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.2. ВГТУ, 2006. 172 с.	Учеб. пособие, 2006	1
Л2.6	Липатов Г.И.	Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.3. Воронеж: ВГТУ, 2008. 227 с.	Учеб. пособие, 2008	1
Л2.7	Липатов Г.И.	Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.4. Воронеж: ГОУ ВПО «ВГТУ», 2010. 173 с.	Учеб. пособие, 2010	1
7.1.3 Методические разработки				
Л3.1	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторной работы «Исследование процесса эпитаксиального осаждения кремния» по курсу «Технология производства ИЭТ». Воронеж: ВГТУ, 2005. 44 с.	Метод. указ., 2005	1
Л3.2	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторной работы «Расчет скорости осаждения пленок из парогазовой фазы в различных режимах протекания процесса и изменения состава пленок по толщине при вакуум-термическом напылении» по курсу «Технология материалов и изделий электронной техники». Воронеж: ВГТУ, 2005. 24 с.	Метод. указ., 2005	1
Л3.3	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторных работ № 3, 4 по курсу «Технология материалов и изделий электронной техники». Воронеж: ГОУ ВПО «ВГТУ», 2010. 37 с.	Метод. указ., 2010	1
Л3.4	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторных работ № 5—7 по курсу «Технология материалов и изделий электронной техники». Воронеж: ГОУ ВПО	Метод. указ., 2010	1

	«ВГТУ», 2010. 36 с.
7.1.4 Программное обеспечение и Интернет-ресурсы	
1	Системы компьютерной математики MatCAD, MATLAB
2	Система физико-топологического моделирования Sentaurus TCAD
3	Интернет-ресурсы: http://www.nanoobr.ru — сайт ОАО «Роснано» 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

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1	Учебный компьютерный класс, оснащенный компьютерными программами для выполнения расчетов, и рабочими местами для самостоятельной подготовки обучающихся с выходом в Интернет
8.2	Технологическое оборудование
8.3	Контрольно-измерительное оборудование

9. СТРУКТУРА И СОСТАВ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонды оценочных средств по дисциплине представляют собой: перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий, варианты экзаменационных билетов.

9.1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий

1. Назовите три основных группы источников загрязнений в чистом производстве.
2. Приведите четыре основных типа загрязнений пластин.
3. Для чего применяют термическое окисление кремния?
4. В каком случае используют окисление в сухом кислороде, а в каком — во влажном или парах воды?
5. Что такое диффузионное легирование, для чего и как оно используется?
6. В чем состоит разница между одностадийным и двухстадийным процессами диффузии?
7. Что такое ионная имплантация, как она используется при легировании полупроводника?
8. В чем различие между распределением примеси при диффузионном и ионном легировании?
9. Степень легирования некоторой локальной области монокристаллического кремния составляет $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Сколько атомов кремния приходится на один атом легирующей примеси?
10. С помощью какого из методов избирательного легирования можно получить максимальную концентрацию примеси на поверхности кристалла?
11. Какое условие необходимо соблюсти при проведении процесса ионной имплантации, чтобы получить профиль легирования, близкий к распределению Гаусса?
12. В чем состоит разница между топологией и вертикальным профилем легирования структуры?
13. Какие легирующие элементы используются для формирования в кремнии областей *n*-типа проводимости?

14. Какие легирующие элементы используются для формирования в кремнии областей p -типа проводимости?

15. Почему алюминий, хотя и находится в III группе элементов таблицы Менделеева и является акцепторной примесью, не используется в качестве диффузанта?

16. Какие существуют механизмы диффузии атомов легирующей примеси?

17. Что такое отжиг? В каком случае он применяется в технологическом процессе производства интегральных микросхем?

18. В чем суть метода химического осаждения слоев из газовой фазы?

19. В чем различие между процессами, идущими с диффузионным и кинетическим контролем?

20. Что такое гетерогенная химическая реакция? В каком технологическом процессе нанотехнологии ее наличие является необходимым условием его нормального течения?

21. Что характеризуют критерии Фурье, Био, Нуссельта и Шервуда, Пекле, Прандтля и Шмидта, Рейнольдса, Грасгоффа?

22. Что такое динамический пограничный слой и чем он обусловлен?

23. Что такое диффузионный пограничный слой и чем он обусловлен?

24. Какой из методов эпитаксии обеспечивает наиболее совершенную структуру растущей пленки?

25. В чем суть метода вакуум-термического нанесения тонких пленок?

26. В чем особенность и реализация метода магнетронного распыления?

27. Что такое фотолитография? Перечислите основные этапы создания рисунка на поверхности пластины с помощью фотолитографии.

28. Какие источники экстремального УФ применяют в фотолитографии?

29. Что такое позитивный, а что такое негативный процессы литографии? В чем их различия?

30. Какими методами можно изменять толщину резиста от номинальной при нанесении методом центрифугирования?

31. Что такое операция совмещения? Какую роль играют метки совмещения? Нарисуйте пример.

32. Какие существуют основные методы улучшения разрешения проекционной фотолитографии?

33. В чем заключается электронно-лучевая литография и её основной недостаток для широкого промышленного применения?

34. Что такое наноимпринт-литография? Приведите примеры различной реализации наноимпринт-литографии.

35. Из каких этапов состоит процесс травления?

36. Поясните смысл характеристик травления «изотропность» и «селективность».

37. Что такое плазма? Приведите простейший пример реактора для травления с помощью плазмы.

38. Что такое емкостно-связанная плазма? Индуктивно-связанная плазма? ЭЦР-плазма?

39. Поясните механизм возникновения положительного потенциала плазмы.

40. От чего зависит величина напряжения самосмещения в плазме?

41. Чем отличается плазмохимическое и реактивно-ионное травление?

42. Какие способы герметизации кристаллов интегральных микросхем вам известны. Дайте краткую характеристику области применения каждого из них.

9.2. Примерные варианты экзаменационных билетов

Билет № 1

1. Необходимость очистки поверхности. Классификация типов загрязнений по форме и виду. Источники загрязнений. Физические и химические методы очистки в жидкой и газовой фазе, механические методы очистки. Методы повышения эффективности очистки.

2. Химическое осаждение слоев из газовой фазы (ХОГФ).
3. При загонке бора в кремний КЭФ-2 при температуре 1050 °С за время $t_1=20$ мин создана поверхностная концентрация $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Найти глубину залегания $p-n$ -перехода, образованного при последующей разгонке при 1200 °С в течение 1,5 ч.

Билет № 2

1. Нанесение тонких пленок методами вакуум-термического напыления и магнетронного распыления.
2. Фотолитография как один из основных промышленных методов получения микро- и наноструктур.
3. Определить энергию и дозу имплантации ионов В для формирования $p-n$ -перехода на глубине 0,3 мкм в кремнии с исходной концентрацией $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Билет № 3

1. Жидкостное химическое травление. Этапы процесса травления. Изотропное и анизотропное травление.
2. Плазма. Методы получения плазмы для травления. Возникновения напряжения смещения электрода в плазме.
3. 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?

Билет № 4

1. Требования к пленочным покрытиям и методы осаждения тонких пленок.
2. Методы улучшения разрешения фотолитографии: уменьшение длины волны излучения, иммерсионная литография, коррекция эффекта близости, фазосдвигающие маски, двойное экспонирование.
3. 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?

Билет № 5

1. Кинетика процесса термического окисления кремния.
2. Плазмохимическое и реактивно-ионное травление, техническая реализация и их отличия.
3. Построить распределение толщины осажденного слоя методом ПФХО, если пластины диаметром 150 мм расположены на расстоянии 15 мм друг от друга, лимитирующей является гетерогенная стадия, имеет место реакция первого порядка, отношение коэффициента диффузии газа к константе скорости реакции 500.

Билет № 6

1. Материалы и инструменты, используемые в технологии подложек.
2. Технология и оборудование магнетронного осаждения.
3. Рассчитать изменение толщины пассивной базы вследствие эмиттерной диффузии фосфора в КЭФ-1 при 1050 °С в течение 1 ч, если введенное в приповерхностную область количество бора, равное $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, предварительно разгоняли при 1150 °С в течение 2 ч.

Билет № 7

1. Технология обработки подложек.
2. Технологический процесс производства КМОП СБИС.

3. При загонке фосфора в кремний КДБ-10 при температуре 1050 °С за время $t_1=20$ мин создана поверхностная концентрация 10^{21} см⁻³. Найти глубину залегания $p-n$ -перехода, образованного при последующей разгонке при 1200 °С в течение 1 ч.

Билет № 8

1. Процессы отмывки кремниевых пластин.
2. Характеристики процессов плазмохимического травления.
3. Рассчитать эффективную концентрацию примеси в КДБ-10 на глубине 3 мкм при последовательной диффузии фосфора ($Q_{(P)}=10^{15}$ см⁻², $T=1100$ °С, $t=3$ ч) и бора ($Q_{(B)}=5 \cdot 10^{15}$ см⁻², $T=1150$ °С, $t=2$ ч).

Билет № 9

1. Контроль параметров и маркировка полупроводниковых пластин.
2. Механизм формирования химически активной плазмы.
3. Рассчитать эффективную концентрацию примеси в КДБ-7,5 на глубине 1,5 мкм при последовательной диффузии фосфора ($N_{0(P)}=10^{21}$ см⁻³, $T=1050$ °С, $t=1,5$ ч) и бора ($N_{0(B)}=5 \cdot 10^{21}$ см⁻³, $T=1150$ °С, $t=3$ ч).

Билет № 10

1. Физико-химические основы процесса эпитаксии.
2. Бесфлюсовая низкотемпературная пайка полупроводниковых приборов и ИС.
3. Пластины кремния марки КЭФ-5 легируют бором с дозой 10^{12} см⁻² при энергии 100 кэВ. Затем проводят отжиг в течение 2 ч при 1000 °С. Чему равна пиковая концентрация бора после отжига?

Билет № 11

1. Термическое окисление кремния.
2. Присоединение выводов полупроводниковых приборов и ИС.
3. Рассчитать глубину залегания $p-n$ -перехода в КЭФ-2, полученного ионной имплантацией бора с энергией $E=100$ кэВ до максимальной концентрации $N_m=10^{20}$ см⁻³ с последующей диффузионной разгонкой при 1150 °С в течение 2 ч.

Билет № 12

1. Кинетика процесса термического окисления кремния.
2. Принципы изотропного и анизотропного травления.
3. Рассчитать градиент концентрации примеси в $p-n$ -переходе, полученном на глубине 3 мкм путем диффузии бора в КЭФ-2 до поверхностной концентрации $N_0=10^{18}$ см⁻³ при 1000 °С.

Билет № 13

1. Особенности технологии и оборудования ПФХО диэлектрических слоев.
2. Травление органических материалов в кислородной плазме.
Кремниевая пластина окисляется несколько раз в процессе изготовления ИС. Найти результирующую толщину окисла после каждой из следующих операций, проводимых последовательно: а) 60 мин при 1100 °С в сухом O₂ и HCl (добавляется достаточное количество HCl, чтобы увеличить скорость окисления на 10 % по сравнению со скоростью окисления в чистом O₂); б) 2 ч при 1000 °С в пирогенном водяном паре (при 1 атм).

Билет № 14

1. Модель процессов ПФХО с лимитирующей гетерогенной стадией.
2. Системы, используемые для плазменного травления.

Рассчитать градиент концентрации примеси в p — n -переходе, полученном на глубине 25 мкм путем диффузии фосфора в КДБ-0,4 до поверхностной концентрации $N_0=3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при 1250 °С.

Билет № 15

1. Модель процессов ПФХО с лимитирующей гомогенной стадией.
2. Технология диффузионного легирования.
3. Поверхностное сопротивление при использовании четырехзондового метода определяется выражением $R_s=(\pi/\ln 2)U/I$. Если при измерениях $I=1$ мА, какое напряжение будет измерено для n -области, в которой суммарная плотность атомов 10^{12} см^{-2} ? Фосфор введен с помощью диффузии в очень высокоомную пластину p -типа.

Билет № 16

1. Свойства реагентов, используемых для ПФХО диэлектрических слоев.
2. Особенности процесса испарения в вакууме. Распределение плотности испаряемого компонента по поверхности подложки.
3. Канал МОП-транзистора легируют бором до максимальной концентрации $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на глубине 0,1 мкм. Найти энергию ионов, дозу легирования и разброс ΔR_p .

Билет № 17

1. Технология и оборудования плазмохимического осаждения слоев.
2. Технология фотолитографии.
3. Выбрать энергию As^+ и дозу облучения для формирования в n -Si с $N_{\text{исх}}=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ сильнолегированного заглубленного слоя n^+ -типа так, чтобы на глубине 0,3 мкм концентрация имплантированной примеси равнялась $N_{\text{макс}}=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Рассчитать результирующую поверхностную концентрацию примеси.

Билет № 18

1. Жидкостное травление Si, SiO₂, Al.
2. Герметизация полупроводниковых приборов и ИС.
3. На кремниевой пластине термическим окислением получен слой SiO₂ толщиной 0,2 мкм. Какое дополнительное время потребуется, чтобы получить еще 0,1 мкм SiO₂ в сухом кислороде при 1200 °С?

Билет № 19

1. Вакуум-термическое напыление тонких пленок.
2. Возникновение и отжиг структурных дефектов при ионном легировании.
3. Построить распределение толщины осажденного слоя методом ПФХО, если пластины диаметром 150 мм расположены на расстоянии 15 мм друг от друга, лимитирующей является гомогенная стадия.

Билет № 20

1. Магнетронное осаждение тонких пленок.
2. Технология монтажа кристаллов.
3. Изолирующая диффузия p^+ -типа проводится сквозь эпитаксиальный слой толщиной 10 мкм, содержащий донорную примесь в концентрации 10^{16} см^{-3} . Эффективная концентрация примеси на поверхности обрабатываемого участка равна $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и остается постоянной в течение всего процесса диффузии. Рассчитайте время, необходимое для проведения этой диффузии при 1100 °С.

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель ученого совета ФРТЭ

_____ В.А. Небольсин

« ____ » _____ 20 г.

Лист регистрации изменений (дополнений) УМКД

«Физико-химические основы нанотехнологии»

В УМКД вносятся следующие изменения (дополнения):

Изменения (дополнения) в УМКД обсуждены на заседании кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники.

Протокол № _____ от « ____ » _____ 20 г.

Зав. кафедрой ППЭНЭ

С.А. Рембеза

Изменения (дополнения) рассмотрены и одобрены методической комиссией ФРТЭ

Председатель методической комиссии ФРТЭ

А.Г. Москаленко

«Согласовано»

С.А. Рембеза

Карта обеспеченности рекомендуемой литературой

№ п/п	Авторы/ составители	Заглавие	Вид и годы издания	Обеспе- ченность
1. Основная литература				
Л1.1	Марголин В.И., Жабреев В.А., Лукьянов Г.Н., Тупик В.А.	Введение в нанотехнологию: СПб.: Лань, 2012. 464 с.	Учеб. для вузов, 2012	1
Л1.2	Малышева И.А.	Технология производства интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1991. 344 с.	Учеб. для вузов, 1991	1
Л1.3	Черняев В.М.	Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.	Учеб. для вузов, 1987	1
2. Дополнительная литература				
Л2.1	Зи С.	Технология СБИС: В 2-х кн. М.: Мир, 1986. Кн.1. 404 с.; кн.2. 453 с.	Учеб. посо- бие, 1986	0,2
Л2.2	Готра З.Ю.	Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.	Справочник, 1991	1
Л2.3	Киреев В.Ю., Столяров А.А.	Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. М.: Техносфера, 2006. 192 с.	Учеб. посо- бие, 2006	0,33
Л2.4	Липатов Г.И.	Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.1. Воронеж: ВГТУ, 2005. 142 с.	Учеб. посо- бие, 2005	1
Л2.5	Липатов Г.И.	Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.2. Воронеж: ВГТУ, 2006. 172 с.	Учеб. посо- бие, 2006	1
Л2.6	Липатов Г.И.	Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.3. Воронеж: ВГТУ, 2008. 227 с.	Учеб. посо- бие, 2008	1
Л2.7	Липатов Г.И.	Технология материалов и изделий электронной техники. Ч.4. Воронеж: ГОУ ВПО «ВГТУ», 2010. 173 с.	Учеб. посо- бие, 2010	1
3. Методические разработки				
Л3.1	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторной работы «Исследование процесса эпитаксиального осаждения кремния» по курсу «Технология производства ИЭТ». Воронеж: ВГТУ, 2005. 44 с.	Метод. указ., 2005	1
Л3.2	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторной работы «Расчет скорости осаждения пленок из парогазовой фазы в различных режимах протекания процесса и изменения состава пленок по толщине при вакуум-термическом напылении» по курсу «Технология материалов и изделий электронной техники». Воронеж: ВГТУ, 2005. 24 с.	Метод. указ., 2005	1
Л3.3	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторных работ № 3, 4 по курсу «Технология материалов и изделий электронной техники». Воронеж: ГОУ ВПО «ВГТУ», 2010. 37 с.	Метод. указ., 2010	1
Л3.4	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторных работ № 5—7 по курсу «Технология материалов и изделий электронной техники». Воронеж: ГОУ ВПО «ВГТУ», 2010. 36 с.	Метод. указ., 2010	1

Зав. кафедрой ППЭНЭ

С.А. Рембеза

Директор НТБ

Т.И. Буковшина

Лист регистрации изменений

Порядковый номер изменения	Раздел, пункт	Вид изменения (заменить, аннулировать, добавить)	Номер и дата приказа об изменении	Фамилия и инициалы, подпись лица, внесшего изменение	Дата внесения изменения