МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ
Директор департамента образования
_____ П. Е. Троян
«___» _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Технология кремниевой наноэлектроники

Уровень образования: **высшее образование - магистратура**
Направление подготовки / специальность: **11.04.04 Электроника и наноэлектроника**
Направленность (профиль) / специализация: **Твердотельная электроника**
Форма обучения: **очная**
Факультет: **ФЭТ, Факультет электронной техники**
Кафедра: **ФЭ, Кафедра физической электроники**
Курс: **1**
Семестр: **1, 2**
Учебный план набора 2017 года

Распределение рабочего времени

№	Виды учебной деятельности	1 семестр	2 семестр	Всего	Единицы
1	Лекции	26		26	часов
2	Практические занятия	18		18	часов
3	Курсовая работа (проект)		16	16	часов
4	Всего аудиторных занятий	44	16	60	часов
5	Из них в интерактивной форме	14		14	часов
6	Самостоятельная работа	64	92	156	часов
7	Всего (без экзамена)	108	108	216	часов
8	Подготовка и сдача экзамена	36		36	часов
9	Общая трудоемкость	144	108	252	часов
		4.0	3.0	7.0	З.Е.

Экзамен: 1 семестр
Курсовая работа (проект): 2 семестр

Томск 2018

Согласована на портале № 29683

Рассмотрена и одобрена на заседании кафедры
протокол № 91 от «19» 4 2018 г.

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Рабочая программа дисциплины составлена с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки (специальности) 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, утвержденного 30.10.2014 года, рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФЭ «___» _____ 20__ года, протокол №_____.

Разработчик:

профессор кафедра ФЭ	_____	Т. И. Данилина
Заведующий обеспечивающей каф. ФЭ	_____	П. Е. Троян

Рабочая программа дисциплины согласована с факультетом и выпускающей кафедрой:

Декан ФЭТ	_____	А. И. Воронин
Заведующий выпускающей каф. ФЭ	_____	П. Е. Троян

Эксперты:

Доцент кафедры физической электроники (ФЭ)	_____	И. А. Чистоедова
Профессор кафедры физической электроники (ФЭ)	_____	С. В. Смирнов

Согласована на портале № 29683

1. Цели и задачи дисциплины

1.1. Цели дисциплины

сформировать представление о явлениях и процессах, на которых основаны технологии микро и наноэлектроники.

1.2. Задачи дисциплины

– Изучение технологии создания структур кремниевой наноэлектроники с учетом технологичности и экономической эффективности технологических процессов;

– Формирование способности к организации и проведению экспериментальных исследований изделий кремниевой наноэлектроники с применением современных средств и методов.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Технология кремниевой наноэлектроники» (Б1.В.ОД.1) относится к блоку 1 (вариативная часть).

Предшествующими дисциплинами, формирующими начальные знания, являются: Технология кремниевой наноэлектроники, Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники, Гетероструктурные полупроводниковые приборы, Методы математического моделирования, Технология арсенид-галлиевой гетероструктурной электроники.

Последующими дисциплинами являются: Технология кремниевой наноэлектроники, Интегральные схемы СВЧ-диапазона, Испытание и контроль изделий электронной техники, Научно-исследовательская работа (рассред.), Проектирование и технология электронной компонентной базы, Физические основы надежности изделий твердотельной электроники.

3. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

– ПК-4 способностью к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов;

– ПК-13 готовностью обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов;

В результате изучения дисциплины обучающийся должен:

– **знать** - физические и химические принципы, лежащие в основе технических процессов кремниевой наноэлектроники; - базовые маршруты создания приборов кремниевой наноэлектроники; - принципы разработки технологических маршрутов наноразмерных интегральных схем;

– **уметь** разрабатывать наноразмерные кремниевые интегральные схемы и технологические маршруты их изготовления

– **владеть** - навыками разработки базовых технологических процессов; - умением разрабатывать технологическую документацию на процессы и маршруты

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7.0 зачетных единицы и представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Трудоемкость дисциплины

Виды учебной деятельности	Всего часов	Семестры	
		1 семестр	2 семестр
Аудиторные занятия (всего)	60	44	16
Лекции	26	26	
Практические занятия	18	18	
Курсовая работа (проект)	16		16
Из них в интерактивной форме	14	14	
Самостоятельная работа (всего)	156	64	92
Подготовка к контрольным работам	26	26	

Согласована на портале № 29683

Выполнение курсового проекта (работы)	92		92
Проработка лекционного материала	6	6	
Подготовка к практическим занятиям, семинарам	32	32	
Всего (без экзамена)	216	108	108
Подготовка и сдача экзамена	36	36	
Общая трудоемкость, ч	252	144	108
Зачетные Единицы	7.0	4.0	3.0

5. Содержание дисциплины

5.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Разделы дисциплины и виды занятий приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Разделы дисциплины и виды занятий

Названия разделов дисциплины	Лек., ч	Прак. зан., ч	Сам. раб., ч	Курс. раб., ч	Всего часов (без экзамена)	Формируемые компетенции
1 семестр						
1 Особенности масштабирования МОП-транзисторов	2	0	8	0	10	ПК-13, ПК-4
2 Методы улучшения характеристик МОП- транзисторов	4	6	8	0	18	ПК-13, ПК-4
3 Субмикронная литография	4	4	8	0	16	ПК-13, ПК-4
4 Методы травления и осаждения в технологии кремниевой нанозлектроники	4	0	8	0	12	ПК-13, ПК-4
5 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем	2	2	8	0	12	ПК-13, ПК-4
6 Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов	2	2	8	0	12	ПК-13, ПК-4
7 Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем	4	4	16	0	24	ПК-13, ПК-4
8 Технологические маршруты изготовления СБИС	4	0	0	0	4	ПК-13, ПК-4
Итого за семестр	26	18	64	0	108	
2 семестр						
9 Получение заданий на курсовой проект	0	0	4	16	4	ПК-13, ПК-4
10 Анализ литературы по теме курсового проекта	0	0	16		16	ПК-13, ПК-4
11 Анализ актуальности, научной и практической значимости	0	0	10		10	ПК-13, ПК-4
12 Выполнение необходимых расчетов	0	0	20		20	ПК-13, ПК-4

Согласована на портале № 29683

по проекту						
13 Анализ полученных результатов	0	0	15		15	ПК-13, ПК-4
14 Выполнение графических материалов	0	0	12		12	ПК-13, ПК-4
15 Оформление курсового проекта	0	0	15		15	ПК-13, ПК-4
Итого за семестр	0	0	92	16	108	
Итого	26	18	156	16	216	

5.2. Содержание разделов дисциплины (по лекциям)

Содержание разделов дисциплин (по лекциям) приведено в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Содержание разделов дисциплин (по лекциям)

Названия разделов	Содержание разделов дисциплины по лекциям	Трудоемкость, ч	Формируемые компетенции
1 семестр			
1 Особенности масштабирования МОП-транзисторов	Особенности масштабирования МОП-транзисторов. Физические ограничения микроминиатюризации	2	ПК-13, ПК-4
	Итого	2	
2 Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов	Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов. Перспективные структуры для дальнейшего повышения быстродействия МОП-транзисторов. КНИ-структуры. SIMOX, Smart Cut технологии. Основные проблемы при разработке наноразмерных МОП-транзисторов. Формирование супермелкозалегающих p-n-переходов	4	ПК-13, ПК-4
	Итого	4	
3 Субмикронная литография	Проекционная литография, электронно-лучевая и ионная литография	4	ПК-13, ПК-4
	Итого	4	
4 Методы травления и осаждения в технологии кремниевой наноэлектроники	Вакуумно-плазменные методы травления и осаждения	4	ПК-13, ПК-4
	Итого	4	
5 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем	Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем. Анализ процесса подзатворного окисления и свойств оксида кремния. Улучшение характеристик подзатворных окислов методом нитрирования. High-k диэлектрики	2	ПК-13, ПК-4
	Итого	2	
6 Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов	Формирование поликремниевых затворов для наноразмерных МОП-транзисторов. Легирование поликремния. Формирование затворов n+- и p+-типов осаждением легированных слоев поликрем-	2	ПК-13, ПК-4

Согласована на портале № 29683

	ния. Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП- транзисторов. Формирование затворов по самосовмещенной технологии		
	Итого	2	
7 Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем	Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем. Особенности медной разводки. Двойной дамасский процесс. Технологический маршрут. Электрохимическое осаждение меди	4	ПК-13, ПК-4
	Итого	4	
8 Технологические маршруты изготовления СБИС	FEOL-процессы. BEOL-процессы. Планаризация микрорельефа. Внутриуровневая и межуровневая разводка	4	ПК-13, ПК-4
	Итого	4	
Итого за семестр		26	
Итого		26	

5.3. Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечивающими (предыдущими) и обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечивающими (предыдущими) и обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Разделы дисциплины и междисциплинарные связи

Наименование дисциплин	№ разделов данной дисциплины, для которых необходимо изучение обеспечивающих и обеспечиваемых дисциплин														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Предшествующие дисциплины															
1 Технология кремниевой наноэлектроники	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2 Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники	+	+	+							+	+	+			
3 Гетероструктурные полупроводниковые приборы		+		+	+	+	+	+	+	+	+		+		
4 Методы математического моделирования		+	+	+		+	+	+				+	+		
5 Технология арсенид-галлиевой гетероструктурной электроники			+	+				+							
Последующие дисциплины															
1 Технология кремниевой нано-									+	+	+	+	+	+	+

Согласована на портале № 29683

электроники															
2 Интегральные схемы СВЧ-диапазона	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+	+		
3 Испытание и контроль изделий электронной техники		+	+	+			+	+							
4 Научно-исследовательская работа (рассред.)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5 Проектирование и технология электронной компонентной базы	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6 Физические основы надежности изделий твердотельной электроники		+	+	+	+		+								

5.4. Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий

Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий представлено в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий

Компетенции	Виды занятий				Формы контроля
	Лек.	Прак. зан.	Курс. раб. (пр.)	Сам. раб.	
ПК-4	+	+	+	+	Контрольная работа, Экзамен, Защита отчета, Собеседование, Защита курсовых проектов (работ), Тест, Отчет по курсовой работе, Отчет по практическому занятию
ПК-13	+	+	+	+	Контрольная работа, Экзамен, Защита отчета, Собеседование, Защита курсовых проектов (работ), Тест, Отчет по курсовой работе, Отчет по практическому занятию

6. Интерактивные методы и формы организации обучения

Технологии интерактивного обучения при разных формах занятий приведены в таблице 6.1.

Согласована на портале № 29683

Таблица 6.1 – Технологии интерактивного обучения при разных формах занятий

Методы	Интерактивные практические занятия, ч	Интерактивные лекции, ч	Всего, ч
1 семестр			
Презентации с использованием видеофильмов с обсуждением		1	1
Мозговой штурм	2	2	4
Исследовательский метод	4		4
Презентации с использованием слайдов с обсуждением		5	5
Итого за семестр:	6	8	14
2 семестр			
Итого за семестр:	0	0	0
Итого	6	8	14

7. Лабораторные работы

Не предусмотрено РУП.

8. Практические занятия (семинары)

Наименование практических занятий (семинаров) приведено в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Наименование практических занятий (семинаров)

Названия разделов	Наименование практических занятий (семинаров)	Трудоемкость, ч	Формируемые компетенции
1 семестр			
2 Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов	Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов. КНИ - структуры. SIMAX технологии. Получение супермелкозалагающих p-n-переходов.	6	ПК-13, ПК-4
	Итого	6	
3 Субмикронная литография	Разрешающая способность проекционной, электронно-лучевой и ионной литографии	4	ПК-13, ПК-4
	Итого	4	
5 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем	Атомно-слоевое осаждение high-k диэлектриков	2	ПК-13, ПК-4
	Итого	2	
6 Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов	Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП-транзисторов	2	ПК-13, ПК-4
	Итого	2	
7 Особенности формирования	Разработка технологических маршрутов наноразмерных КМОП ИС	4	ПК-13, ПК-4

Согласована на портале № 29683

наноразмерных КМОП интегральных схем	Итого	4	
Итого за семестр		18	
Итого		18	

9. Самостоятельная работа

Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формируемые компетенции представлены в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формируемые компетенции

Названия разделов	Виды самостоятельной работы	Трудоемкость, ч	Формируемые компетенции	Формы контроля
1 семестр				
1 Особенности масштабирования МОП-транзисторов	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	2	ПК-13, ПК-4	Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен
	Подготовка к контрольным работам	6		
	Итого	8		
2 Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	4	ПК-13, ПК-4	Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен
	Подготовка к контрольным работам	4		
	Итого	8		
3 Субмикронная литография	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	4	ПК-13, ПК-4	Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен
	Подготовка к контрольным работам	4		
	Итого	8		
4 Методы травления и осаждения в технологии кремниевой нанозлектроники	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	2	ПК-13, ПК-4	Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен
	Подготовка к контрольным работам	6		
	Итого	8		
5 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	6	ПК-13, ПК-4	Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен
	Подготовка к контрольным работам	2		
	Итого	8		
6 Формирование	Подготовка к практиче-	4	ПК-13,	Контрольная работа, От-

Согласована на портале № 29683

затворов для наноразмерных МОП-транзисторов	ским занятиям, семинарам		ПК-4	чет по практическому занятию, Тест, Экзамен
	Подготовка к контрольным работам	4		
	Итого	8		
7 Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	10	ПК-13, ПК-4	Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен
	Проработка лекционного материала	6		
	Итого	16		
Итого за семестр		64		
	Подготовка и сдача экзамена	36		Экзамен
2 семестр				
9 Получение заданий на курсовой проект	Выполнение курсового проекта (работы)	4	ПК-13, ПК-4	Отчет по курсовой работе, Тест
	Итого	4		
10 Анализ литературы по теме курсового проекта	Выполнение курсового проекта (работы)	16	ПК-13, ПК-4	Отчет по курсовой работе, Тест
	Итого	16		
11 Анализ актуальности, научной и практической значимости	Выполнение курсового проекта (работы)	10	ПК-13, ПК-4	Отчет по курсовой работе, Тест
	Итого	10		
12 Выполнение необходимых расчетов по проекту	Выполнение курсового проекта (работы)	20	ПК-13, ПК-4	Отчет по курсовой работе, Тест
	Итого	20		
13 Анализ полученных результатов	Выполнение курсового проекта (работы)	15	ПК-13, ПК-4	Отчет по курсовой работе, Тест
	Итого	15		
14 Выполнение графических материалов	Выполнение курсового проекта (работы)	12	ПК-13, ПК-4	Отчет по курсовой работе, Тест
	Итого	12		
15 Оформление курсового проекта	Выполнение курсового проекта (работы)	15	ПК-13, ПК-4	Защита курсовых проектов (работ), Тест
	Итого	15		
Итого за семестр		92		
Итого		192		

10. Курсовая работа (проект)

Трудоемкость аудиторных занятий и формируемые компетенции в рамках выполнения курсовой работы (проекта) представлены таблице 10.1.

Согласована на портале № 29683

Таблица 10.1 – Трудоемкость аудиторных занятий и формируемые компетенции в рамках выполнения курсовой работы (проекта)

Наименование аудиторных занятий	Трудоемкость, ч	Формируемые компетенции
2 семестр		
Методы улучшения характеристик МОП- транзисторов;	4	ПК-13, ПК-4
Субмикронная литография	2	
Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем	4	
Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов	2	
Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем	4	
Итого за семестр	16	

10.1. Темы курсовых работ (проектов)

Примерная тематика курсовых работ (проектов):

- 1. Ионное легирование стенок и дна тренчей для создания конденсаторов в ИС
- 2. Получение мелкозалегающих p-n переходов с помощью ионов бора различных масс
- 3. Синтез структур кремний на изоляторе: SIMOX
- 4. Технология КМОП-схемы с легированными областями
- 5. Синтез структур кремний на изоляторе: Smart Cut
- 6. Сканирующая ионная литография
- 7. Анизотропное глубокое травление кремния с большим аспектным числом
- 8. Формирование силицидных пленок путем ионной имплантации
- 9. Инженерия затворов в технологии МОП-СБИС с субмикронными размерами
- 10. Разработка технологии изготовления КМОП-СБИС с ретроградным распределением примеси в канале
- 11. Формирование СБИС на основе гетероструктур SiGe с помощью ионной имплантации
- 12. Формирование супермелкозалегающих p-n переходов с помощью наклонной ионной имплантации в технологии МОП-СБИС
- 13. Применение ионной имплантации в технологии МОП-СБИС для управления пороговым напряжением
- 14. Проблемы металлизации в технологии СБИС
- 15. Инженерия затвора в технологии МОП-СБИС с субмикронными размерами
- 16. Разработка технологии МОП-СБИС с LDD областями и самосовмещением
- 17. Формирование гетеробиполярного транзистора с базой p-SiGe с помощью ионной имплантации
- 18. Формирование элементов наноэлектроники с субмикронными размерами с помощью пучковых технологий

11. Рейтинговая система для оценки успеваемости обучающихся

11.1. Балльные оценки для элементов контроля

Таблица 11.1 – Балльные оценки для элементов контроля

Элементы учебной	Максимальный	Максимальный	Максимальный	Всего за

Согласована на портале № 29683

деятельности	балл на 1-ую КТ с начала семестра	балл за период между 1КТ и 2КТ	балл за период между 2КТ и на конец семестра	семестр
1 семестр				
Контрольная работа	6	6		12
Отчет по практическому занятию	20	10	10	40
Тест	6	6	6	18
Итого максимум за период	32	22	16	70
Экзамен				30
Нарастающим итогом	32	54	70	100
2 семестр				
Защита курсовых проектов (работ)			40	40
Отчет по курсовой работе	20	20	20	60
Итого максимум за период	20	20	60	100
Нарастающим итогом	20	40	100	100

11.2. Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Пересчет баллов в оценки за контрольные точки представлен в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Баллы на дату контрольной точки	Оценка
≥ 90% от максимальной суммы баллов на дату КТ	5
От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ	4
От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ	3
< 60% от максимальной суммы баллов на дату КТ	2

11.3. Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку представлен в таблице 11.3.

Таблица 11.3 – Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Оценка (ГОС)	Итоговая сумма баллов, учитывает успешно сданный экзамен	Оценка (ECTS)
5 (отлично) (зачтено)	90 - 100	A (отлично)
4 (хорошо) (зачтено)	85 - 89	B (очень хорошо)
	75 - 84	C (хорошо)
	70 - 74	D (удовлетворительно)
3 (удовлетворительно) (зачтено)	65 - 69	
	60 - 64	E (посредственно)
2 (неудовлетворительно) (не зачтено)	Ниже 60 баллов	F (неудовлетворительно)

Согласована на портале № 29683

12. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

12.1. Основная литература

1. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие / Анищенко Е. В., Данилина Т. И., Кагадей В. А. - 2011. 263 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/552, дата обращения: 09.06.2018.

12.2. Дополнительная литература

1. Процессы микро- и нанотехнологии : учебное пособие для вузов / Т. И. Данилина [и др.]; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск: ТУСУР, 2005. - 316 с. (103.) (наличие в библиотеке ТУСУР - 103 экз.)
2. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Высшая школа, 1986. - 367 с. (20) (наличие в библиотеке ТУСУР - 20 экз.)
3. Данилина Т.И., Смирнов С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС. Учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2000. - 140 с. (52) (наличие в библиотеке ТУСУР - 52 экз.)
4. Технология кремниевой наноэлектроники : учеб.пособие / Т.И. Данилина, В.А. Кагадей, Е.В. Анищенко. - 2-е изд. - Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. - 319 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 37 экз.)

12.3. Учебно-методические пособия

12.3.1. Обязательные учебно-методические пособия

1. Технология кремниевой наноэлектроники: Методические указания по выполнению курсового проекта / Данилина Т. И. - 2017. 45 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/6844, дата обращения: 09.06.2018.
2. Технология кремниевой наноэлектроники: Практико-ориентированное учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе / Данилина Т. И. - 2017. 61 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/6845, дата обращения: 09.06.2018.

12.3.2. Учебно-методические пособия для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Учебно-методические материалы для самостоятельной и аудиторной работы обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предоставляются в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

Для лиц с нарушениями зрения:

- в форме электронного документа;
- в печатной форме увеличенным шрифтом.

Для лиц с нарушениями слуха:

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

12.4. Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1. eLIBRARY.RU - www.elibrary.ru

13. Материально-техническое обеспечение дисциплины и требуемое программное обеспечение

13.1. Общие требования к материально-техническому и программному обеспечению дисциплины

13.1.1. Материально-техническое и программное обеспечение для лекционных занятий

Для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации используется учебная аудитория с количеством по-

Согласована на портале № 29683

садочных мест не менее 22-24, оборудованная доской и стандартной учебной мебелью. Имеются демонстрационное оборудование и учебно-наглядные пособия, обеспечивающие тематические иллюстрации по лекционным разделам дисциплины.

13.1.2. Материально-техническое и программное обеспечение для практических занятий

Учебная аудитория

учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для проведения групповых и индивидуальных консультаций, помещение для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации

634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 117 ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Установка совмещения и экспонирования ЩА-310;
- Установка для нанесения фоторезиста;
- Электронный микроскоп УЭМВ-100К;
- Дистиллятор воды;
- Лабораторное оборудование и приборы: микроскоп МБС-9, микроскоп стерео МС-1, микроинтерферометр МИИ-4, химическая посуда, реактивы;
- Учебная доска;
- Проектор;
- Ноутбук;
- Экран для проектора;
- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение:

– Windows XP

13.1.3. Материально-техническое и программное обеспечение для самостоятельной работы

Для самостоятельной работы используются учебные аудитории (компьютерные классы), расположенные по адресам:

- 634050, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 40, 233 ауд.;
- 634045, Томская область, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146, 201 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 47, 126 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 207 ауд.

Состав оборудования:

- учебная мебель;
- компьютеры класса не ниже ПЭВМ INTEL Celeron D336 2.8ГГц. - 5 шт.;
- компьютеры подключены к сети «Интернет» и обеспечивают доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.

Перечень программного обеспечения:

- Microsoft Windows;
- OpenOffice;
- Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows;
- 7-Zip;
- Google Chrome.

13.2. Материально-техническое обеспечение дисциплины для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Освоение дисциплины лицами с ограниченными возможностями здоровья и инвалидами осуществляется с использованием средств обучения общего и специального назначения.

При занятиях с обучающимися **с нарушениями слуха** предусмотрено использование звуко-

Согласована на портале № 29683

усиливающей аппаратуры, мультимедийных средств и других технических средств приема/передачи учебной информации в доступных формах, мобильной системы преподавания для обучающихся с инвалидностью, портативной индукционной системы. Учебная аудитория, в которой занимаются обучающиеся с нарушением слуха, оборудована компьютерной техникой, аудиотехникой, видеотехникой, электронной доской, мультимедийной системой.

При занятиях с обучающимися **с нарушениями зрениями** предусмотрено использование в лекционных и учебных аудиториях возможности просмотра удаленных объектов (например, текста на доске или слайда на экране) при помощи видеоувеличителей для комфортного просмотра.

При занятиях с обучающимися **с нарушениями опорно-двигательного аппарата** используются альтернативные устройства ввода информации и другие технические средства приема/передачи учебной информации в доступных формах, мобильной системы обучения для людей с инвалидностью.

14. Оценочные материалы и методические рекомендации по организации изучения дисциплины

14.1. Содержание оценочных материалов и методические рекомендации

Для оценки степени сформированности и уровня освоения закрепленных за дисциплиной компетенций используются оценочные материалы в составе:

14.1.1. Тестовые задания

1. Почему разрешающая способность электронно-лучевой литографии выше, чем оптической фотолитографии?

а) энергия электронов меньше, чем энергия фотонов;

б) длина волны излучения для ускоренных электронов меньше, чем длина волны УФ-излучения;

в) длина волны для ускоренных электронов больше, чем длина волны УФ-излучения.

г) энергия электронов больше, чем энергия фотонов.

2. Чем обусловлен размерный эффект близости в ЭЛЛ?

а) уширением электронного пучка за счет рассеяния электронов;

б) уменьшением диаметра электронного луча;

в) увеличением расстояния между линиями.

г) увеличением диаметра электронного пучка

3. Выбрать расстояние между линиями шириной bmin при экспонировании резиста электронным лучом диаметром dmin: a – расстояние между линиями.

а) a=(b_min-d_min);

б) a>(b_min-d_min);

в) a=1/2 (b_min-d_min).

г) a = 2 (bmin-dmin)

4. Выбрать рекомендуемый диапазон толщины резиста в ЭЛЛ, исходя из технико-экономических соображений…

а) (5 – 20) нм;

б) (50 – 100) нм;

в) более 100 нм.

г) менее 5 нм.

5. Указать причину, по которой для ионной имплантации бора используют тяжелые молекулы, содержащие бор…

а) увеличение энергии ионов бора;

б) увеличение xp-n;

в) уменьшение xp-n.

г) уменьшение энергии ионов бора.

6. Как надо изменить параметры ионной имплантации при получении заданного xp-n, если заменить моноион бора на кластерный ион, состоящий из 50 атомов бора?

а) дозу уменьшить в 50 раз, а энергию кластера увеличить в 50 раз;

б) дозу увеличить в 50 раз, а энергию кластера уменьшить в 50 раз;

в) энергию и дозу уменьшить в 50 раз.

Согласована на портале № 29683

г) энергию и дозу увеличить в 50 раз.

7. Определить дозу ионов кислорода при формировании захоронненого слоя SiO2 по SIMOX-технологии при атомной плотности кремния N0 и при проецированном пробеге ионов кислорода Rp.

а) Q=2·N_0·R_p;

б) Q=N_0·R_p;

в) Q=1/2·N_0·R_p.

г) Q=4 N0Rp

8. Толщина отсеченного слоя кремния в КНИ структурах, сформированных по SIMOX-технологии, определяется концентрацией кислорода в Si, которая должна быть…

а) равна или больше N0;

б) равна или меньше N0;

в) равна N0.

г) равна 2N0

9. Какую концентрацию германия надо обеспечить при формировании слоя Si0,7Ge0,3 в МОП-транзисторах с целью создания напряженного кремния для канала? Подложка – кремний с атомной плотностью N0.

а) равную 0,7·N0;

б) равную 0,3·N0;

в) равную 0,3/0,7·N0.

г) равную 0,7/0,3

10. Время экспонирования одного элемента разложения в ЭЛЛ будет меньше, если…

а) выбрать резист с более высокой чувствительностью S0;

б) сфокусировать луч до меньшего размера dmin;

в) уменьшить яркость источника электронов B.

г) выбрать резист с более низкой чувствительностью

11. Как связана минимальная ширина экспонируемой линии bmin с диаметром сфокусированного электронного луча dmin с учетом бокового рассеяния электронов Δy?

а) b_min=d_min+Δy;

б) b_min=d_min+2Δy;

в) b_min=d_min+1/2 Δy.

г) bmin=dmin+4Δy.

12. Как следует выбирать параметры для установки ЭЛЛ I0, U0, если требуется обеспечить высокую разрешающую способность?

а) уменьшать I0, увеличивать U0.

б) увеличивать I0, уменьшать U0.

в) увеличивать I0, увеличивать U0.

г) увеличить I0, не меняя U0.

13. Чему будет равна глубина xp-n для перехода база-коллектор, если база сформирована ионной имплантацией бора с проецированным пробегом 37,5 нм и максимальной концентрацией в базе 3·1019 см-3? Коллектор сформирован эпитаксией с концентрацией N_k=2·〖10〗^16 〖см〗^3

а) 35 нм;

б) 50 нм;

в) 95 нм.

г) 115 нм.

14. Ионно-лучевое травление является результатом…

а) физического распыления ионами инертных газов в высоком вакууме;

б)физического распыления и химической реакции;

в) травлением за счет радикалов.

г) физического распыления ионами инертных газов в плазме.

15. ПХТ является результатом…

а) физического распыления в условиях газового разряда ионами инертных газов;

б) травления ХАЧ в условиях воздействия плазмы;

в) физического распыления ионами инертных газов в условиях высокого вакуума.

Согласована на портале № 29683

г) физического распыления ионами инертного газа в плазме.

16. Степень анизотропии травления рабочего слоя определяется следующим образом…

а) V_В/V_Г ;

б) V_Г/V_В ;

в) V_пл/V_подл .

где V_В, V_Г – соответственно скорости травления рабочего слоя в вертикальном и горизонтальном направлениях; V_пл, V_подл – соответственно скорости травления пленки и подложки.

г) Vподл/ Vпл.

17. Чему равна селективность травления, если скорость травления маски в два раза больше скорости травления подложки?

а) 0,5;

б) 1;

в) 1,5.

г) 2

18. Какой получится размер линии в пленке толщиной 0,5 мкм в результате анизотропного травления с А=10, если размер маски 0,5 мкм?

а) 0,5;

б) 0,4;

в) 0,6.

г) 0,7

19. Для обеспечения высокой разрешающей способности ионно-лучевого травления необходимы маски:

а) с высоким коэффициентом распыления материала маски;

б) с низким коэффициентом распыления материала маски;

в) коэффициент распыления не влияет

г) с переменным коэффициентом распыления

20. Для обеспечения высокой разрешающей способности боковые стенки маски должны быть …

а) вертикальными;

б) горизонтальными;

в) под углом 45°.

г) под углом 60 градусов.

14.1.2. Экзаменационные вопросы

Вариант 1

1. Рассмотреть возможность уменьшения глубины залегания p-n перехода за счет аморфизации приповерхностных слоев кремния.

2. Сравнение электронной и ионной литографии.

Вариант 2

1. Объяснить появление эффекта близости. Исследовать влияние толщины резиста на получение малых экспонируемых областей при их близком взаимном расположении.

2. Оценить глубину залегания p-n перехода при легировании моноионами бора и кластерными ионами

Вариант 3

1. Применение ионного легирования для самосовмещения затвора с областями стока-истока в МДП-транзисторах.

2. Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП-интегральных схем.

Вариант 4

1. Субмикронная фотолитография.

2. Формирование силицидных пленок с помощью ионной имплантации.

Вариант 5

1. Технология электронно-лучевой литографии. Время экспонирования.

2. Транзисторы с каналом на основе напряженного кремния и SiGe

Согласована на портале № 29683

Вариант 6

1. Рассмотреть возможность управления профилем распределения примеси и глубиной залегания xp-n при ионном легировании.

2. Технология анизотропного травления для формирования «тренчей».

Вариант 7

1. Рассмотреть боковое рассеяние ионов и его влияние на распределение примеси при ионной имплантации через окно заданного размера. Сформулировать условие, когда боковое рассеяние следует учитывать.

2. Оценить требуемую анизотропию травления пленки для реактивного ионно-лучевого травления с точностью 20 % при bм=1 мкм.

Вариант 8

1. Рассмотреть возможность формирования структуры с однородным распределением примеси для элементов памяти на основе аморфного кремния.

2. Анизотропия и селективность травления при ионно-лучевом травлении глубоких профилей.

Вариант 9

1. Атомно-слоевое осаждение пленок.

2. Проблемы межуровневой изоляции в технологии СБИС.

Вариант 10

1. Рассмотреть формирование LDD областей в технологии МОП СБИС и предусмотреть одновременное самосовмещение областей истока - стока с затвором.

2. Объяснить влияние энергии электронов на разрешающую способность ЭЛЛ.

Вариант 11

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность ЭЛЛ и ионно-лучевой литографии.

2. Плазмохимическое травление (ПХТ). Достоинства и недостатки по сравнению с ионно-лучевым травлением.

Вариант 12

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ (I0, U0) для обеспечения высокой разрешающей способности.

2. Рассмотреть возможность применения ионной имплантации для формирования каналов МОП-транзисторов с ретроградным распределением примеси

Вариант 13

1. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования областей исток-стока с концентрацией более 1020 см-3 и глубиной xp-n менее 10 нм.

2. Как следует выбирать ток пучка электронов I0 при ЭЛЛ?

Вариант 14

1. Сравнить методы экспонирования резиста (проекционная ФЛ и электронно-лучевая литография) и рекомендовать наиболее подходящий метод для получения размеров менее 65 нм с учетом технико-экономических соображений.

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации в SIMOX-технологии для получения заданной толщины отсеченного слоя Si и SiO2.

Вариант 15

1. Представить технологию изготовления биполярного транзистора с помощью ионной имплантации для формирования базы и эмиттера. Коллектор - эпитаксиальный слой. Представить распределение примеси для n-p-n транзистора.

2. На какую глубину dП можно протравить подложку через маску толщиной dм при ионном травлении.

14.1.3. Темы контрольных работ

Вариант 1

1. Почему разрешающая способность электронной литографии выше, чем оптической?

2. Объяснить, зачем при ионной имплантации ионов бора используют тяжелые молекулы, содержащие бор.

Вариант 2

Согласована на портале № 29683

1. Как получается рисунок при последовательной ЭЛЛ?

2. Представить распределение бора по глубине при ионной имплантации моноионов бора и кластерных ионов при одинаковом ускоряющем напряжении и дозе облучения на установке. Кластер состоит из 50 атомов.

Вариант 3

1. Рассмотреть взаимосвязь между минимальной шириной экспонируемой линии и диаметром сфокусированного луча.

2. Рассчитать параметры ионной имплантации для молекулы B10H14, если энергия моноионов бора составляет 0,1 кэВ, а доза облучения – 5·1013 ион/см2.

Вариант 4

1. Объяснить влияние энергии электронов на разрешающую способность ЭЛЛ.

2. Как изменится xp-n, если для легирования бором вместо моноиона бора взять молекулярный ион B18H22, при прочих равных условиях.

Вариант 5

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ (I0, U0), если требуется обеспечить требуемую разрешающую способность?

2. Как надо изменить параметры ионной имплантации при получении заданного xp-n, Nmax, Nисх, если заменить моноионы бора на молекулярный ион B18H22.

Вариант 6

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность проекционной и ЭЛЛ.

2. Объяснить, зачем делается предварительная аморфизация приповерхностного слоя кремния при формировании супермелкозалегающих p-n переходов.

Вариант 7

1. Объяснить, к чему приведет увеличение тока в пучке I0 при ЭЛЛ?

2. Объяснить, какое необходимо получить распределение кислорода при формировании захороненного слоя SiO2 по SIMOX-технологии.

Вариант 8

1. Объяснить, из каких соображений следует выбирать материал и конструкцию катода для установки ЭЛЛ?

2. Объяснить, как рассчитать дозу кислорода, которая потребуется для формирования стехиометрического слоя SiO2 по SIMOX-технологии.

Вариант 9

1. Сравнить методы экспонирования резиста (проекционная ФЛ и электронно-лучевая литография) и рекомендовать наиболее подходящий метод для получения размеров менее 20 нм с учетом технико-экономических соображений.

2. Представить распределение примеси кислорода по глубине в SIMOX-технологии для получения заданной толщины отсеченного слоя Si и SiO2

Вариант 10

1. Из каких соображений следует выбирать ток пучка I0 при ЭЛЛ?

2. Объяснить, при решении каких задач используется ионная имплантация в кремний через слой SiO2 и представить распределение примеси для двух толщин SiO2.

Вариант 11

1. Каким образом выбрать установку ЭЛЛ для получения заданного размера bmin?

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования низколегированных областей истока-стока МОП-транзисторов (LDD-области).

Вариант 12

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии.

2. Обосновать выбор технологии ионной имплантации для формирования каналов с ретроградным распределением примеси. Представить требуемое распределение примеси в канале.

Вариант 13

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ (I0, U0) для обеспечения высокой разрешающей способности?

Согласована на портале № 29683

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования областей исток-сток с концентрацией более 1020 см-3 и глубиной xp-n менее 10 нм. Предложить практическую реализацию.

Вариант 14

1. Как изменится диаметр электронного пучка на подложке, если необходимо увеличить ток с 10-8 до 10-5 А?

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования металлического затвора из силицида металла CoSi2.

Вариант 15

1. Объяснить, при каких условиях необходимо в ЭЛЛ учитывать явления дифракции.

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования в канале МОП-транзистора слоя Si0,7 Ge0,3 с целью создания напряженного кремния для канала.

Вариант 16

1. Объяснить, какую выбрать энергию электронов 100 кэВ или 10 кэВ с целью уменьшения эффекта рассеяния электронов в слое резиста.

2. Объяснить необходимость формирования низколегированных LDD-областей в МОП-транзисторах с помощью ионной имплантации.

14.1.4. Вопросы на собеседование

По темам курсовых проектов

14.1.5. Вопросы для подготовки к практическим занятиям, семинарам

Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов. КНИ - структуры. SIMAX технологии. Получение супермелкозалагающих p-n-переходов.

Разрешающая способность проекционной, электронно-лучевой и ионной литографии

Атомно-слоевое осаждение high-k диэлектриков

Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП-транзисторов

Разработка технологических маршрутов наноразмерных КМОП ИС

14.1.6. Темы курсовых проектов (работ)

1.Ионное легирование стенок и дна тренчей для создания конденсаторов в ИС

2.Получение мелкозалегающих p-n переходов с помощью ионов бора различных масс

3.Синтез структур кремний на изоляторе: SIMOX

4.Технология КМОП-схемы с легированными областями

5.Синтез структур кремний на изоляторе: Smart Cut

6.Сканирующая ионная литография

7.Анизотропное глубокое травление кремния с большим аспектным числом

8.Формирование силицидных пленок путем ионной имплантации

9.Инженерия затворов в технологии МОП-СБИС с субмикронными размерами

10. Разработка технологии изготовления КМОП-СБИС с ретроградным распределением примеси в канале

14.2. Требования к оценочным материалам для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предусмотрены дополнительные оценочные материалы, перечень которых указан в таблице 14.

Таблица 14 – Дополнительные материалы оценивания для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Категории обучающихся	Виды дополнительных оценочных материалов	Формы контроля и оценки результатов обучения
С нарушениями слуха	Тесты, письменные самостоятельные работы, вопросы к зачету, контрольные работы	Преимущественно письменная проверка
С нарушениями зрения	Собеседование по вопросам к зачету, опрос по терминам	Преимущественно устная проверка (индивидуально)

Согласована на портале № 29683

С нарушениями опорно-двигательного аппарата	Решение дистанционных тестов, контрольные работы, письменные самостоятельные работы, вопросы к зачету	Преимущественно дистанционными методами
С ограничениями по общемедицинским показаниям	Тесты, письменные самостоятельные работы, вопросы к зачету, контрольные работы, устные ответы	Преимущественно проверка методами исходя из состояния обучающегося на момент проверки

14.3. Методические рекомендации по оценочным материалам для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предусматривается доступная форма предоставления заданий оценочных средств, а именно:

- в печатной форме;
- в печатной форме с увеличенным шрифтом;
- в форме электронного документа;
- методом чтения ассистентом задания вслух;
- предоставление задания с использованием сурдоперевода.

Лицам с ограниченными возможностями здоровья и инвалидам увеличивается время на подготовку ответов на контрольные вопросы. Для таких обучающихся предусматривается доступная форма предоставления ответов на задания, а именно:

- письменно на бумаге;
- набор ответов на компьютере;
- набор ответов с использованием услуг ассистента;
- представление ответов устно.

Процедура оценивания результатов обучения лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

Для лиц с нарушениями зрения:

- в форме электронного документа;
- в печатной форме увеличенным шрифтом.

Для лиц с нарушениями слуха:

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

При необходимости для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов процедура оценивания результатов обучения может проводиться в несколько этапов.

Согласована на портале № 29683