МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

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

УТВЕРЖДАЮ
Директор департамента образования
(Проректор по учебной работе)
_____ **Л. А. Боков**
«6» 07 2015 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ТЕХНОЛОГИЯ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Уровень основной образовательной программы магистратура (академическая)

Направления подготовки **11.04.04** «Электроника и наноэлектроника»

Профиль(и) «Твердотельная электроника»

Форма обучения очная

Факультет электронной техники (ФЭТ)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

Курс 1 **Семестр** 1, 2

Учебный план набора 2015 года и последующих лет.

Распределение рабочего времени:

№	Виды учебной работы	Семестр 1	Семестр 2	Семестр 3	Семестр 4	Семестр 5	Семестр 6	Семестр 7	Семестр 8	Всего	Единицы
1.	Лекции	26	-							26	часов
2.	Лабораторные работы	-	-							-	часов
3.	Практические занятия	18	-							18	часов
4.	Курсовой проект/работа (КРС) (аудиторная)	-	16							16	часов
5.	Всего аудиторных занятий (Сумма 1-4)	44	16							60	часов
6.	Из них в интерактивной форме	18	-							18	часов
7.	Самостоятельная работа студентов (СРС)	64	92							156	часов
8.	Всего (без экзамена) (Сумма 5,7)	108	108							216	часов
9.	Самост. работа на подготовку, сдачу экзамена	36	-							36	часов
10.	Общая трудоемкость (Сумма 8,9)	144	108							252	часов
	(в зачетных единицах)	4	3							7	ЗЕТ

Экзамен 1 семестр **Диф. зачет** 2 семестр

Томск 2015

Согласована на портале № 12438

Рассмотрена и одобрена на заседании кафедры
протокол № 57 от « 2 » 7 2015 г.

Лист согласований

Рабочая программа составлена с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» (квалификация (степень) магистр), утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 октября 2014 г.

Рабочая программа учебной дисциплины рассмотрена и утверждена на заседании кафедры физической электроники от «2» мая 2015 г., протокол № 57.

Разработчик:
Профессор кафедры ФЭ _____ / Т.И. Данилина

Заведующий кафедрой
Профессор кафедры ФЭ _____ / П.Е. Троян

Рабочая программа согласована с факультетом, профилирующей и выпускающей кафедрами направления подготовки.

Декан ФЭТ _____ / А.И. Воронин

Зав. профилирующей кафедрой ФЭ _____ / П.Е. Троян

Зав. выпускающей кафедрой ФЭ _____ / П.Е. Троян

Эксперты:
Председатель методической комиссии факультета ФЭТ _____ / И.А. Чистоедова

Председатель методической комиссии кафедры ФЭ _____ / И.А. Чистоедова

Согласована на портале № 12438

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Эффективное развитие наноэлектроники в настоящее время в значительной степени сдерживается технологическими возможностями создания реальных приборов и устройств. Магистр, подготовленный в рамках дисциплины «Технология кремниевой наноэлектроники», должен, с одной стороны, хорошо представлять явления и процессы, на которых основано приборное направление, а с другой стороны, свободно владеть методами и средствами технологии микро-наноэлектроники.

В задачи дисциплины входит изучение технологических процессов создания наноразмерных элементов и структур, технологических маршрутов сверхбольших интегральных схем (СБИС) с наноразмерными элементами, формирование знаний в области кремниевой наноэлектроники и формирование навыков разработки технологических маршрутов изготовления СБИС.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Дисциплина «Технология кремниевой наноэлектроники» (Б1.В.ОД.1) относится к обязательным дисциплинам вариативной части по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» в соответствии с ФГОС 3+.

Изучение данной дисциплины базируется на знании следующих дисциплин: «Физика конденсированного состояния», «Основы технологии электронной компонентной базы», «Физико-химические основы процессов микро- и нанотехнологии».

Основные положения дисциплины необходимы магистрантам при изучении дисциплин: «Проектирование и технология электронной компонентной базы», «Приборно-технологическое моделирование», «Физические основы надежности изделий твердотельной электроники».

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Изучение дисциплины направлено на формирование у магистрантов *компетенций* :

– способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом (ОК-2);

– способность использовать результаты освоения дисциплин программы магистратуры (ОПК-2);

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

– готовность обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов (ПК-13).

3.2. В результате изучения дисциплины магистрант 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.

Согласована на портале № 12438

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 зачетных единиц.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры	
		1	2
Аудиторные занятия (всего)	**60**	**44**	**16**
В том числе:	-	-	-
Лекции	26	26	-
Практические занятия (ПЗ)	18	18	-
Курсовой проект (аудиторная нагрузка)	16	-	16
Самостоятельная работа (всего)	**156**	**64**	**92**
В том числе:	-	-	-
Курсовой проект (самостоятельная работа)	92	-	92
Расчетно-графические работы		-	-
Подготовка к контрольным работам и практическим занятиям	34	34	-
Подготовка к докладам на практических занятиях	30	30	-
Вид промежуточной аттестации (*экзамен*)	36	36	-
Общая трудоемкость час	**252**	**144**	**108**
Зачетные Единицы Трудоемкости	7	**4**	**3**

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1. Разделы дисциплин и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Лекции	Практич. занятия.	Курсовой проект	Самост. работа студента	Всего час	Формируемые компетенции (ОК, ПК)
1.	Особенности масштабирования МОП-транзисторов	2	-	2	15	19	ОК-2, ОПК-2
2.	Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов	4	6	2	15	27	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13
3.	Субмикронная литография	4	4	2	15	25	ОК-2, ОПК-2, ПК-13
4.	Методы травления и осаждения в технологии кремниевой наноэлектроники	4	-	2	15	21	ОК-2, ОПК-2, ПК-13
5.	Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем	2	2	2	15	21	ОК-2, ОПК-2
6.	Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов	2	2	2	15	21	ОПК-2, ПК-4, ПК-13
7.	Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем	4	2	2	15	23	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13
8.	Технологические маршруты изготовления СБИС	4	2	2	51	59	ОК-2, ОПК-2, ПК-13

5.2. Содержание разделов дисциплины (по лекциям)

№ п/п	Наименование разделов	Содержание разделов	Трудоемкость (час.)	Формируемые компетенции (ОК, ПК)
1.	Особенности масштабирования МОП-транзисторов	Особенности масштабирования МОП-транзисторов. Физические ограничения микроминиатюризации.	2	ОК-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. Форми-	4	ОК-2, ОПК-2, ПК-13

Согласована на портале № 12438

		рование супермелкозалегающих *p-n*-переходов.		
3.	Субмикронная литография	Проекционная литография, электронно-лучевая и ионная литография	4	ОК-2, ОПК-2, ПК-13
4.	Методы травления и осаждения в технологии кремниевой наноэлектроники	Вакуумно-плазменные методы травления и осаждения на 3D-структуры..	4	ОК-2, ОПК-2, ПК-13
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	ОК-2, ОПК-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 поликремния. Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП-транзисторов. Формирование затворов по самосовмещенной технологии.	2	ОК-2, ОПК-2
7.	Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем	Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем. Особенности медной разводки. Технологии создания медной разводки на кремниевом кристалле интегральной микросхемы. Двойной дамасский процесс. Технологический маршрут. Материалы для диффузно-барьерного слоя. Электрохимическое осаждение меди.	4	ОК-2, ОПК-2, ПК-13
8.	Технологические маршруты изготовления СБИС	FEOL-процессы. BEOL-процессы. Планаризация микрорельефа. Внутриуровневая и межуровневая разводка.	4	ОК-2, ОПК-2, ПК-13

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

№ п/п	Наименование обеспечивающих (предыдущих) и обеспечиваемых (последующих) дисциплин	№ № разделов данной дисциплины, для которых необходимо изучение обеспечивающих (предыдущих) и обеспечиваемых (последующих) дисциплин							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Предшествующие дисциплины									
1.	Физика конденсированного состояния	+	+			+			
2.	Основы технологии электронной компонентной базы		+			+	+		
3.	Физико-химические основы процессов микро- и нанотехнологии		+	+	+	+	+		+
Последующие дисциплины									
1.	Приборно-технологическое моделирование	+	+		+		+	+	+
2.	Физические основы надежности изделий твердотельной электроники	+	+			+	+		
3.	Проектирование и технология электронной компонентной базы	+	+					+	+

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

Перечень компетенций	Виды занятий				Формы контроля
	Л	Пр.	КРС	СРС	
ОК-2	+	+	+	+	Выступление с докладом-презентацией, защита курсового проекта, выполнение практических заданий
ОПК-2	+	+	+	+	Тест, отчет по практической работе, защита курсо-

Согласована на портале № 12438

					вого проекта
ПК-4		+	+	+	Отчет по практической работе, выступление с докладом-презентацией, защита курсового проекта
ПК-13	+	+	+	+	Отчет по практической работе, выступление с докладом-презентацией, защита курсового проекта

6. МЕТОДЫ И ФОРМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ

Технологии интерактивного обучения при разных формах занятий в часах

Методы / Формы	Лекции (час)	Практические занятия (час)	Всего
Мультимедийные презентации с последующим обсуждением	5		5
«Мозговой штурм» (атака)		2	2
Тесты	2		2
Исследовательский метод (выполнение и защита индивидуальных заданий)		4	4
Доклад-презентация		5	5
Итого интерактивных занятий	7	11	18

7. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

не предусмотрено

8. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ (СЕМИНАРЫ)

№ п/п	№ раздела дисциплины	Тематика практических занятий (семинаров)	Трудоемкость (час.)	Компетенции ОК, ПК
1.	2	Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов. КНИ – структуры. SIMAX технологии	4	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13
2.	2	Получение супермелкозалагающих *p-n*-переходов	2	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13
3.	3	Разрешающая способность проекционной, электронно-лучевой и ионной литографии	4	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13
4.	5	Атомно-слоевое осаждение *high-k* диэлектриков	2	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13
5.	6	Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП-транзисторов	2	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13
6.	7-8	Разработка технологических маршрутов наноразмерных КМОП ИС	4	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13

9. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА (1 семестр)

№ п/п	№ раздела дисциплины	Тематика самостоятельной работы *(детализация)*	Трудоемкость (час.)	Компетенции ОК, ПК	Контроль выполнения работы
1	1	Физические ограничения масштабирования МОП-транзисторов. Субмикронная фотолитография. Пучковые методы нанолитографии.	8	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
2	2	КНИ-структуры, SIMOX, Smart Cut – технология. Ионное и ионно-плазменное легирование. Плазменное и ионно-химическое травление.	8	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контроль-

Согласована на портале № 12438

					ным работам.
3.	3	Субмикронная литография. Проекционная, электронно-лучевая, лазерная литография. Наноимпринтинг.	8	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
4.	4	Методы травления: ионное, реактивно-ионное. Bosh-процесс. Вакуумно-плазменные методы осаждения.	8	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Доклад-презентация. Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
5	5	Формирование подзатворных диэлектриков. Расчеты режимов осаждения диэлектриков, термическое нитрирование слоев SiO_2, high-k–диэлектрики. Электрические свойства тонких окислов МОП-структур, модель токов утечки. Активируемые плазмой методы получения пленок.	8	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
6	6	Формирование поликремниевых затворов для субмикронных транзисторов, снижение степени проникновения бора из затвора в область канала ионной имплантацией азота, легирование поликремния, формирование затворов n^+- и p^+ - типов осаждением легированных слоев поликремния. Силицидная технология формирования затворов, формирование затворов по самосовмещенной технологии.	8	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
7	7-8	Технологический маршрут изготовления самосовмещенных КМОП интегральных схем с n и p-карманами. Проблемы металлизации наноразмерных интегральных схем. Технология создания медной разводки, двойной дамасский процесс, материалы для диффузно-барьерного слоя. Электрохимическое осаждение меди. Межуровневая изоляция диэлектриками low-k, транзисторы с каналом на основе напряженного кремния или SiGe.	16	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Доклад-презентация, выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
8	1-5	Подготовка и сдача экзамена	36		Сдача экзамена

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА (2 семестр)

№ п/п	№ раздела дисциплины	Тематика самостоятельной работы *(детализация)*	Трудоемкость (час.)	Компетенции ОК, ПК	Контроль выполнения работы
1	1	Физические ограничения масштабирования МОП-транзисторов. Субмикронная фотолитография. Пучковые методы нанолитографии.	10	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
2	2	КНИ-структуры, SIMOX, Smart Cut – технология. Ионное и ионно-плазменное легирование. Плазменное и ионно-химическое травление.	10	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
3.	3	Субмикронная литография. Проекци-	10	ОК-2, ОПК-2,	Выполнение индивиду-

Согласована на портале № 12438

		онная, электронно-лучевая, лазерная литография. Наноимпринтинг.		ПК-4, ПК-13	альных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
4.	4	Методы травления: ионное, реактивно-ионное. Bosh-процесс. Вакуумно-плазменные методы осаждения.	10	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Доклад-презентация. Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
5	5	Формирование подзатворных диэлектриков. Расчеты режимов осаждения диэлектриков, термическое нитрирование слоев SiO_2, high-k–диэлектрики. Электрические свойства тонких окислов МОП-структур, модель токов утечки. Активируемые плазмой методы получения пленок.	10	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
6	6	Формирование поликремниевых затворов для субмикронных транзисторов, снижение степени проникновения бора из затвора в область канала ионной имплантацией азота, легирование поликремния, формирование затворов n^+- и p^+ - типов осаждением легированных слоев поликремния. Силицидная технология формирования затворов, формирование затворов по самосовмещенной технологии.	10	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.
7	7-8	Технологический маршрут изготовления самосовмещенных КМОП интегральных схем с n и p-карманами. Проблемы металлизации наноразмерных интегральных схем. Технология создания медной разводки, двойной дамасский процесс, материалы для диффузно-барьерного слоя. Электрохимическое осаждение меди. Межуровневая изоляция диэлектриками low-k, транзисторы с каналом на основе напряженного кремния или SiGe.	32	ОК-2, ОПК-2, ПК-4, ПК-13	Доклад-презентация, выполнение индивидуальных заданий на практических занятиях, подготовка к контрольным работам.

10. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА 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. Технология планаризации при изготовлении КМОП-ИС.
9. Формирование силицидных пленок путем ионной имплантации.
10. Инженерия затворов транзисторов.
11. Современные проблемы формирования трехмерных структур СБИС.
12. Пучковые методы нанолитографии.
13. Структура и технология транзисторов на SiGe с напряженным кремнием.
14. Формирование межэлементных соединений и межуровневой разводки.

Согласована на портале № 12438

15. Технология получения монокристаллических полупроводниковых слоев на аморфных диэлектрических и гибких подложках.

16. Современное состояние технологии многоуровневой системы металлизации кремниевых ИС.

11. РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ

Таблица 11.1. Балльные оценки для элементов контроля дисциплины

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую КТ с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Контрольная работа	10			**10**
Доклад-презентация		20		**20**
Практические занятия	20	10	10	**40**
Итого максимум за период:	**30**	**30**	**10**	**70**
Сдача экзамена (максимум)				**30**
Нарастающим итогом	**30**	**60**	**70**	**100**

Таблица 11.2. Балльные оценки для элементов контроля курсового проектирования

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую КТ с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Получение заданий на курсовой проект	4			**4**
Подбор и обзор литературы	12			**12**
Выполнение необходимых расчетов по проекту	4	18		**22**
Выполнение необходимых графических работ		4	4	**8**
Полное оформление работы			12	**12**
Компонент своевременности	4	4	4	**12**
Итого максимум за период	**24**	**26**	**20**	**70**
Защита проекта (максимум)				**30**
Нарастающим итогом	**24**	**50**	**70**	**100**

Таблица 11.3. 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

Таблица 11.4. 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)
3 (удовлетворительно) (зачтено)	**70 - 74**	D (удовлетворительно)
	65 – 69	
	60 - 64	E (посредственно)
2 (неудовлетворительно), (не зачтено)	**Ниже 60 баллов**	F (неудовлетворительно)

Согласована на портале № 12438

12. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

12.1. Основная литература

1. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой наноэлектроники: учебн. пособие. – Томск, В-Спектр, 2011. – 262 с. (**3**)
2. Данилина Т.И., Кагадей В.А. Технология СБИС. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2011. – 287 с.- [электронный ресурс] – адрес: miel.tusur.ru.

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**.)
2. Данилина Т.И. Технология СБИС. Учебное пособие. –Томск: ТУСУР, 2007. – 287 с. (**50**)
3. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с. (**20**)
4. Данилина Т.И., Смирнов С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2000. – 140 с. (**52**)

12.3. Учебно-методические пособия и программное обеспечение

1. Данилина Т.И. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе. – Томск: ТУСУР, 2012. – 56 с. – http://miel.tusur.ru/images/files/Данилина_Т_И_Технология_кремниевой_наноэлектроники_(УМП).pdf
2. Данилина Т.И. Технология кремниевой наноэлектроники: Методические указания по выполнению курсового проекта. – Томск: ТУСУР, 2013. – 25 с. – http://miel.tusur.ru/images/files
3. Офисные программы Microsoft Office или Open Office.

13. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для реализации программы учебной дисциплины требуется аудитория, оснащенная мультимедийным проектором; для реализации практических занятий – компьютерный класс.

14. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

14.1. Лекционные занятия

Организация и проведение лекционных занятий осуществляются следующим образом:

– все лекции читаются с использованием *мультимедийных презентаций* с необходимым раздаточным и демонстрационным материалом и обязательным обсуждением. Также отдельные лекции будут сопровождаться показом видеороликов и их дальнейшим обсуждением;

– *«мозговой штурм» (атака)* – при обсуждении большинства тем перед аудиторией ставятся короткие простые задания, не требующие для выполнения большого объема времени и являющиеся автономными от прочитанного ранее материала. Ответ на вопрос может дать любой студент, а преподаватель выступает в роли третейского судьи.

14.2. Практические занятия

Организация и проведение практических занятий осуществляются следующим образом:

– *практики* проводятся в классической форме – решение заданий, сдача отчета во время текущего или в начале следующего занятия;

– *доклады-презентации студентов*: для успешного формирования профессиональной компетенции студентам предлагается подготовить сообщения по определенной тематике (до 20

БИБЛИОТЕКА ТУСУР

Согласована на портале № 12438

минут) в виде докладов-презентаций и выступить с ними во время практических занятий. При необходимости преподаватель дополняет сделанное студентом сообщение.

14.3. Методы контроля знаний

Формы контроля и оценки знаний студентов следующие:

– *тестирование* и *контрольные работы* необходимы для проставления оценок по 1КТ и 2КТ;

– *экзамен*: примерный перечень вопросов к экзамену приведен в п. 14.4.

14.4. Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Физические ограничения микроминиатюризации МОП-транзисторов.
2. Пути повышения быстродействия наноразмерных МОП-транзисторов.
3. Технология формирования КНИ-структур.
4. Методы получения супермелкозалегающих p-n переходов.
5. Формирование поликремниевых затворов.
6. Плазмо-химическое травление глубоких тренчей.
7. Технология получения high-k подзатворных диэлектриков.
8. Технологии формирования силицидных пленок для затворов МОП-транзисторов путем ионной имплантации.
9. Структура и технология транзисторов на SiGe с напряженным кремнием.
10. Формирование межэлементных соединений и межуровневой разводки.
11. Современные проблемы формирования трехмерных структур СБИС.

Согласована на портале № 12438

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой физической электроники (ФЭ

_____ **П. Е. Троян**

«___»_____2016 г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

Технология кремниевой наноэлектроники

(полное наименование учебной дисциплины или практики)

Уровень основной образовательной программы магистратура (академическая)

Направление(я) подготовки (специальность) 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Профиль(и) «Твердотельная электроника»

(полное наименование профиля направления подготовки (специальности))

Форма обучения очная

Факультет электронной техники (ФЭТ)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

Курс 1 **Семестр 1,2**

Учебный план набора 2015 года и последующих лет.

Зачет _____семестр **Диф. зачет 2 семестр**

Экзамен 1 семестр

Разработчик: профессор кафедры ФЭ Данилина Т.И.

Томск 2016

Согласована на портале № 12438

1 Введение

Фонд оценочных средств (ФОС) является приложением к рабочей программе дисциплины «Технология кремниевой наноэлектроники» и представляет собой совокупность контрольно-измерительных материалов (типовые задачи (задания), контрольные работы, тесты и др.) и методов их использования, предназначенных для измерения уровня достижения студентом установленных результатов обучения.

ФОС по дисциплине «Технология кремниевой наноэлектроники» используется при проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации студентов.

Перечень закрепленных за дисциплиной «Технология кремниевой наноэлектроники» компетенций приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень закрепленных за дисциплиной компетенций

Код	Формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции
ОК-2	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом	Должен знать методы организации исследовательских и проектных работ в коллективе. Должен уметь организовывать исследовательские и проектные работы. Должен владеть навыками управления коллективом.
ОПК-2	Способность использовать результаты освоения дисциплин программы магистратуры	Должен знать базовые и современные технологии кремниевой наноэлектроники. Должен уметь использовать базовые и современные технологии. Должен владеть результатами освоения базовых и современных технологий.

Согласована на портале № 12438

ПК-4	Способность к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов	Знать современные методы экспериментальных исследований в области кремниевой наноэлектроники Уметь организовать экспериментальные исследования Владеть методами экспериментальных исследований с применением современных средств и методов
ПК-13	Готовность обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов	Знать технологические процессы изготовления изделий кремниевой наноэлектроники и методы оценки их экономической эффективности Уметь обеспечивать технологичность производства изделий кремниевой наноэлектроники Владеть навыками оценки технологичности и экономической эффективности технологических процессов

2 Реализация компетенций

1 Компетенция ОК-2

ОК-2: способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом.

Для формирования компетенции необходимо осуществить ряд этапов. Этапы формирования компетенции, применяемые для этого виды занятий, и используемые средства оценивания представлены в таблице 2.

Таблица 2– Этапы формирования компетенции ОК-2 и используемые средства оценивания

1. Состав	Знать	Уметь	Владеть
Содержание этапов	Знает методы организации исследовательских и проектных работ в коллективе.	Умеет организовывать исследовательские и проектные работы.	Владеет навыками управления коллективом.

Согласована на портале № 12438

Виды занятий	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовой проект • Самостоятельная работа	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовой проект • Самостоятельная работа	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовой проект • Самостоятельная работа
Используемые средства оценивания	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов • Экзамен	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов • Экзамен	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов • Экзамен

2 Компетенция ОПК-2

ОПК-2: Способность использовать результаты освоения дисциплин программы магистратуры.

Для формирования компетенции необходимо осуществить ряд этапов. Этапы формирования компетенции, применяемые для этого виды занятий, и используемые средства оценивания представлены в таблице 3.

Таблица 3– Этапы формирования компетенции ОПК-2 и используемые средства оценивания

2. Состав	**Знать**	**Уметь**	**Владеть**
Содержание этапов	Знает базовые и современные технологии кремниевой наноэлектроники.	Умеет использовать базовые и современные технологии.	Владеет результатами освоения базовых и современных технологий.
Виды занятий	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа
Используемые средства оценивания	• Контрольные работы; • Доклад -	• Контрольные работы; • Доклад -	• Контрольные работы; • Доклад -

Согласована на портале № 12438

	презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов • Экзамен	презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов • Экзамен	презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов • Экзамен

3 Компетенция ПК-4

ПК-4: Способность к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов

Для формирования компетенции необходимо осуществить ряд этапов. Этапы формирования компетенции, применяемые для этого виды занятий, и используемые средства оценивания представлены в таблице 4.

Таблица 4– Этапы формирования компетенции ПК-4 и используемые средства оценивания

3. Состав	Знать	Уметь	Владеть
Содержание этапов	Знать современные методы экспериментальных исследований в области кремниевой наноэлектроники	Уметь организовать экспериментальные исследования	Владеть методами экспериментальных исследований с применением современных средств и методов
Виды занятий	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа
Используемые средства оценивания	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов • Экзамен

Согласована на портале № 12438

	• Экзамен	• Экзамен	

4 Компетенция ПК-13

ПК-13: Готовность обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов.

Для формирования компетенции необходимо осуществить ряд этапов. Этапы формирования компетенции, применяемые для этого виды занятий, и используемые средства оценивания представлены в таблице 5.

Таблица 5– Этапы формирования компетенции ПК-13 и используемые средства оценивания

4. Состав	Знать	Уметь	Владеть
Содержание этапов	Знать технологические процессы изготовления изделий кремниевой наноэлектроники и методы оценки их экономической эффективности	Уметь обеспечивать технологичность производства изделий кремниевой наноэлектроники	Владеть навыками оценки технологичности и экономической эффективности технологических процессов
Виды занятий	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа	• Лекции; • Практические занятия; • Курсовые проекты • Самостоятельная работа
Используемые средства оценивания	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов	• Контрольные работы; • Доклад - презентация • Практические задания; • Защита курсовых проектов

Согласована на портале № 12438

	• Экзамен	• Экзамен	• Экзамен

1. Компетенция ОК-2 - Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом

Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам приведены в таблице 6

Таблица 6 – Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Обладает фактическими и теоретическими знаниями в пределах изучаемой области с пониманием границ применимости	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для развития творческих решений	Контролирует работу, проводит оценку, совершенствует методику работы
Хорошо (базовый уровень)	Знает факты, принципы, процессы, общие понятия в пределах изучаемой области	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для решения определенных проблем в области исследования	Берет ответственность за завершение задач в исследовании, приспосабливает свое поведение к обстоятельствам в решении проблем
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Обладает базовыми общими знаниями	Обладает основными умениями, требуемыми для выполнения простых задач	Работает при прямом наблюдении

Формулировка показателей и критериев оценивания компетенции ОК-2 приведена в таблице 7.

Таблица 7 – Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Знает методы организации исследовательских и проектных работ в коллективе.	Умеет организовывать исследовательские и проектные работы.	Владеет навыками управления коллективом.

Согласована на портале № 12438

Хорошо (базовый уровень)	Знает методы организации исследовательских и проектных работ в коллективе.	Умеет организовывать исследовательские и проектные работы.	Владеет навыками управления коллективом.
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Знает базовые методы организации исследовательских и проектных работ в коллективе.	Умеет организовывать простейшие исследовательские и проектные работы.	Владеет навыками управления коллективом при контроле специалиста.

2. Компетенция ОПК-2 - Способность использовать результаты освоения дисциплин программы магистратуры

Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам приведены в **таблице 8**.

Таблица 8 – Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Обладает фактическими и теоретическими знаниями в пределах изучаемой области с пониманием границ применимости	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для развития творческих решений, абстрагирования проблем	Контролирует работу, проводит оценку, совершенствует действия работы
Хорошо (базовый уровень)	Знает факты, принципы, процессы, общие понятия в пределах изучаемой области	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для решения определенных проблем в области исследования	Берет ответственность за завершение задач в исследовании, приспосабливает свое поведение к обстоятельствам в решении проблем
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Обладает базовыми общими знаниями	Обладает основными умениями, требуемыми для выполнения простых задач	Работает при прямом наблюдении

Формулировка показателей и критериев оценивания компетенции **ОПК-2** приведена в таблице 9.

Таблица 9 - Показатели и критерии оценивания компетенции на этапах

Согласована на портале № 12438

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Знает базовые и современные технологии кремниевой наноэлектроники.	Умеет использовать базовые и современные технологии.	Владеет результатами освоения базовых и современных технологий.
Хорошо (базовый уровень)	Знает базовые и современные технологии кремниевой наноэлектроники.	Умеет использовать базовые технологии.	Владеет результатами освоения базовых технологий.
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Знает базовые технологии кремниевой наноэлектроники	Умеет использовать простые базовые технологии.	Владеет результатами освоения простых базовых технологий.

3. Компетенция ПК-4 - Способность к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов

Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам приведены в **таблице 10**.

Таблица 10 – Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Обладает фактическими и теоретическими знаниями в пределах изучаемой области с пониманием границ применимости	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для развития творческих решений, абстрагирования проблем	Контролирует работу, проводит оценку, совершенствует действия работы
Хорошо (базовый уровень)	Знает факты, принципы, процессы, общие понятия в пределах изучаемой области	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для решения определенных проблем в области исследования	Берет ответственность за завершение задач в исследовании, приспосабливает свое поведение к обстоятельствам в

Согласована на портале № 12438

			решении проблем
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Обладает базовыми общими знаниями	Обладает основными умениями, требуемыми для выполнения простых задач	Работает при прямом наблюдении

Формулировка показателей и критериев оценивания компетенции **ПК-4** приведена в таблице 11.

Таблица 11 - Показатели и критерии оценивания компетенции на этапах

Показатели и критерии	**Знать**	**Уметь**	**Владеть**
Отлично (высокий уровень)	Знает современные методы экспериментальных исследований в области кремниевой наноэлектроники	Умеет организовать экспериментальные исследования	Владеет методами экспериментальных исследований с применением современных средств и методов.
Хорошо (базовый уровень)	Знает современные базовые методы экспериментальных исследований в области кремниевой наноэлектроники	Умеет организовать базовые экспериментальные исследования	Владеет базовыми методами экспериментальных исследований и методов.
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Знает базовые методы экспериментальных исследований в области кремниевой наноэлектроники	Умеет организовать простые экспериментальные исследования	Владеет методами простых экспериментальных исследований с применением современных средств и методов.

4. Компетенция ПК-13 - Готовность обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов

Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам приведены в таблице 12.

Согласована на портале № 12438

Таблица 12 – Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Обладает фактическими и теоретическими знаниями в пределах изучаемой области с пониманием границ применимости	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для развития творческих решений, абстрагирования проблем	Контролирует работу, проводит оценку, совершенствует действия работы
Хорошо (базовый уровень)	Знает факты, принципы, процессы, общие понятия в пределах изучаемой области	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для решения определенных проблем в области исследования	Берет ответственность за завершение задач в исследовании, приспосабливает свое поведение к обстоятельствам в решении проблем
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Обладает базовыми общими знаниями	Обладает основными умениями, требуемыми для выполнения простых задач	Работает при прямом наблюдении

Формулировка показателей и критериев оценивания компетенции **ПК-13** приведена в таблице 13.

Таблица 13 - Показатели и критерии оценивания компетенции на этапах

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Знает технологические процессы изготовления изделий кремниевой наноэлектроники и методы оценки их экономической эффективности	Умеет обеспечивать технологичность производства изделий кремниевой наноэлектроники	Владеет навыками оценки технологичности и экономической эффективности технологических процессов

Согласована на портале № 12438

Хорошо (базовый уровень)	Знает базовые технологические процессы изготовления изделий кремниевой наноэлектроники и методы оценки их экономической эффективности	Умеет обеспечивать технологичность производства базовых изделий кремниевой наноэлектроники	Владеет базовыми навыками оценки технологичности и экономической эффективности технологических процессов
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Знает базовые технологические процессы изготовления изделий кремниевой наноэлектроники	Умеет обеспечивать технологичность производства простых изделий кремниевой наноэлектроники	Владеет навыками оценки технологичности и простых технологических процессов

3 Типовые контрольные задания

Для реализации вышеперечисленных задач обучения используются, необходимые для оценки знаний, умений, навыков, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, в составе: тесты, контрольные работы, индивидуальные задания, практические задания, лабораторные работы, экзамен.

Типовые задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, в составе:

3.1 Контрольные работы:

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

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

Согласована на портале № 12438

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

2. Рассчитать параметры ионной имплантации для молекулы $B_{10}H_{14}$, если энергия моноионов бора составляет 0,1 кэВ, а доза облучения – $5 \cdot 10^{13}$ ион/см^2.

Вариант 4

1. Объяснить влияние энергии электронов на разрешающую способность ЭЛЛ.

2. Как изменится $x_{p\text{-}n}$, если для легирования бором вместо моноиона бора взять молекулярный ион $B_{18}H_{22}$, при прочих равных условиях.

Вариант 5

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ (I_0, U_0), если требуется обеспечить требуемую разрешающую способность?

2. Как надо изменить параметры ионной имплантации при получении заданного $x_{p\text{-}n}$, N_{max}, $N_{исх}$, если заменить моноионы бора на молекулярный ион $B_{18}H_{22}$.

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 I_0 при ЭЛЛ?

2. Объяснить, какое необходимо получить распределение кислорода при формировании захороненного слоя SiO_2 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 SiO_2 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 SiO_2.

Вариант 10

1. Из каких соображений следует выбирать ток пучка I_0 при ЭЛЛ?

2. Объяснить, при решении каких задач используется ионная имплантация в кремний через слой SiO_2 и представить распределение примеси для двух толщин SiO_2.

Вариант 11

1. Каким образом выбрать установку ЭЛЛ для получения заданного размера b_{min}?

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.

Согласована на портале № 12438

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 (I_0, U_0) для обеспечения высокой разрешающей способности?

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования областей истока-стока с концентрацией более 10^{20} $см^{-3}$ и глубиной x_{p-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 $CoSi_2$.

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 $Si_{0,7}$ $Ge_{0,3}$ 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.

3.2. Тесты по следующим разделам:

1) Ионно-лучевое травление;

2) Ионно-плазменное травление;

3) Плазмо-химическое травление;

4) Плазмо-химическое осаждение пленок

3.3. Выполнение домашних индивидуальных заданий:

Вариант 1

Разработать технологический маршрут изготовления КМОП-инвертора с использованием областей LDD, карманов n и p-типов с ретроградным распределением примеси и операции самосовмещения.

Вариант 2

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

Вариант 3

Разработать технологический маршрут изготовления монолитной интегральной схемы BIFET. Слои гетеробиполярного транзистора HBT расположены на поверхности p-HEMT структуры. HBT и p-

Согласована на портале № 12438

HEMT разделены высоколегированным слоем GaAs, который является активным слоем p-HEMT и высоколегированным коллектором HBT.

Вариант 4

Рассмотреть возможность уменьшения глубины залегания p-n перехода за счет наклонной имплантации. Рассчитать зависимость x_{p-n} от угла наклона.

Вариант 5

Разработать технологический маршрут изготовления интегральной схемы BIFET по гибридной технологии. Подложка – GaAs. FET-слои выращены одновременно со структурой HBT: рабочий слой и стоп-слой совмещены со слоем эмиттера.

Вариант 6

Рассмотреть возможность получения супермелкозалегающих p-n переходов путем легирования атомами отдачи. Рассчитать параметры ионной имплантации для реализации этого метода.

Вариант 7

Разработать технологический маршрут изготовления интегральной схемы SiGe BiCMOS: definition, содержащей гетеробиполярный транзистор с базой SiGe, КМОП, резисторы на основе поликремния.

Вариант 8

Каналирование ионов. Получить условия каналирования при различных энергиях ионов. Рассчитать распределение концентрации примеси на глубине с учетом эффекта каналирования. Мишень – кремний. Ионы – бор, фосфор. Энергия ионов 50-150 кэВ. Доза облучения 10^{12}-10^{15} ион/см^2.

Вариант 9

Разработать технологический маршрут изготовления интегральной схемы, содержащей гетеробиполярные транзисторы SiGe на КНИ-подложках.

Вариант 10

Рассмотреть возможность применения ионной имплантации для формирования каналов с ретроградным распределением примеси. Рассчитать требуемые параметры ионной имплантации.

Вариант 11

Разработать технологический маршрут изготовления SiGe BICMOS на подложке Si-p$^-$ и с коллектором – n$^+$. База – p-SiGe. Контакт эмиттера – металл или силицид металла.

Вариант 12

Рассмотреть боковое рассеяние ионов и рассчитать его влияние на распределение примеси при ионной имплантации через окно заданного размера. Сформулировать условия, когда боковое рассеяние надо учитывать.

Вариант 13

Рассмотреть формирование LDD областей в технологии МОП-СБИС и предусмотреть одновременное самосовмещение областей стока-истока с затвором. Рассчитать требуемые параметры ионной имплантации.

Вариант 14

Сформировать биполярный p-n-p транзистор и рассчитать параметры ионной имплантации для формирования базы и эмиттера. Коллектор – эпитаксиальный слой кремния.

Вариант 15

Разработать технологический маршрут изготовления КМОП-СБИС на КНИ-подложках с каналом на основе напряженного кремния. Рассчитать параметры ионной имплантации для формирования слоев SiGe в областях истока и стока и в слоях под каналом.

3.4. Темы практических занятий:

Согласована на портале № 12438

1) Методы улучшения характеристик МОП - транзисторов. КНИ - структуры. SIMAX технологии;

2) Получение супермелкозалагающих p-n-переходов;

3) Разрешающая способность проекционной, электронно-лучевой и ионной литографии;

4) Атомно-слоевое осаждение high-k диэлектриков;

5) Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП-транзисторов;

6) Разработка технологических маршрутов наноразмерных КМОП ИС.

3.5. Экзамен:

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.

Вариант 6

1. Рассмотреть возможность управления профилем распределения примеси и глубиной залегания $x_{p\text{-}n}$ 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 $b_м$=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

Согласована на портале № 12438

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 (I_0, U_0) 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 истока-стока с концентрацией более 10^{20} $см^{-3}$ и глубиной $x_{p\text{-}n}$ менее 10 нм.

2. Как следует выбирать ток пучка электронов I_0 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 SiO_2.

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 $d_П$ можно протравить подложку через маску толщиной $d_м$ при ионном травлении.

4 Методические материалы

Для обеспечения процесса обучения и решения задач обучения используются следующие материалы:

4.1. Основная литература

4.1.1. Технология кремниевой наноэлектроники: учебное пособие/ Т.И.Данилина, В.А.Кагадей, Е.В. Анищенко. – 2-е изд. – Томск: ТУСУР, 2015. – 319 с.

Согласована на портале № 12438

4.1.2. Данилина Т.И., Кагадей В.А. Технология СБИС. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2015. – 287 с.- [электронный ресурс] – адрес: miel.tusur.ru

4.2. Дополнительная литература

4.2.1. 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)

4.2.2. Данилина Т.И. Технология СБИС. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 287 с. (50)

4.2.3. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.:Высшая школа, 1986. – 367 с. (20)

4.2.4. Данилина Т.И., Смирнов С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 200.- 140 с. (52)

4.3. Учебно-методические пособия и программное обеспечение

4.3.1. Данилина Т.И. Технология кремниевой наноэлектроники: Практико-ориентированное учебно-методическое пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016.– 61 с. - http://miel.tusur.ru/images/files

4.3.2. Данилина Т.И. Технология кремниевой наноэлектроники: Методические указания по выполнению курсового проекта. – Томск: ТУСУР, 2013. – 25 с. - http://miel.tusur.ru/images/files

4.4. Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

4.5. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для реализации лекционных и практических занятий необходимы: компьютер с необходимым программным обеспечением, проектор и экран.

Согласована на портале № 12438