МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

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

УТВЕРЖДАЮ
Директор департамента по УР
_____Ким М.Ю.
«29» _____10_____ 2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ТЕХНОЛОГИЯ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Уровень образования: **высшее образование - бакалавриат**
Направление подготовки / специальность: **28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника**
Направленность (профиль) / специализация: **Проектирование и технология микросистем**
Форма обучения: **очная**
Факультет: **Институт радиоэлектронной техники (ИРЭТ)**
Кафедра: **физической электроники (ФЭ)**
Курс: **4**
Семестр: **7**
Учебный план набора 2026 года

Объем дисциплины и виды учебной деятельности

Виды учебной деятельности	7 семестр	Всего	Единицы
Лекционные занятия	26	26	часов
Практические занятия	26	26	часов
в т.ч. в форме практической подготовки	18	18	часов
Лабораторные занятия	16	16	часов
в т.ч. в форме практической подготовки	16	16	часов
Самостоятельная работа	40	40	часов
Подготовка и сдача экзамена	36	36	часов
Общая трудоемкость (включая промежуточную аттестацию)	144	144	часов
	4	4	з.е.

Формы промежуточной аттестации	Семестр
Экзамен	7

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Ким М.Ю.
Должность: Директор департамента по УР
Дата подписания: 29.10.2025
Уникальный программный ключ:
ed789cd8-2cc6-4431-a59e-8f386b1d44fa

Томск

Согласована на портале № 84178

1. Общие положения

1.1. Цели дисциплины

1. освоение студентами комплекса теоретических и практических знаний в области перспективных технологических процессов, которые позволяют увеличить степень интеграции схем, и позволяют создавать сверхбольшие интегральные схемы для кремниевой наноэлектроники.

1.2. Задачи дисциплины

1. формирование знаний в области нанотехнологий кремниевой наноэлектроники.
2. изучение базовых технологических процессов производства СБИС для кремниевой наноэлектроники.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП

Блок дисциплин: Б1. Дисциплины (модули).
Часть блока дисциплин: Часть, формируемая участниками образовательных отношений.
Модуль дисциплин: Модуль направленности (major).
Индекс дисциплины: Б1.В.02.09.
Реализуется с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий.

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО и основной образовательной программой (таблица 3.1):
Таблица 3.1 – Компетенции и индикаторы их достижения

Компетенция	Индикаторы достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
Универсальные компетенции		
-	-	-
Общепрофессиональные компетенции		
-	-	-
Профессиональные компетенции		

Согласована на портале № 84178

ПК-1. Способен проводить физико-математическое моделирование исследуемых процессов нанотехнологии и объектов нано- и микросистемной техники с использованием современных компьютерных технологий	ПК-1.1. Знает основные физические и математические модели объектов микро- и наносистемной техник	знает физические и математические модели объектов микро- и наносистемной техники; физико-химические основы базовых технологических процессов производства кремниевых ИС;
	ПК-1.2. Знает основные программные средства для физического и математического моделирования приборов и устройств микро- и наносистемной техники	знает программные средства для физического и математического моделирования приборов и устройств микро- и наносистемной техники; физико-химические основы базовых технологических процессов производства кремниевых ИС;
	ПК-1.3. Умеет представлять объекты микро- и наносистемной техники в виде физических и математических моделей	умеет представлять объекты микро- и наносистемной техники в виде физических и математических моделей; выбирать методику синтеза и анализа материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; систематизировать результаты исследований параметров и характеристик приборов, устройств; уметь выбирать оптимальные технологические процессы;
	ПК-1.4. Владеет практическими навыками работы в прикладных программах компьютерного моделирования	владеет навыками работы в прикладных программах компьютерного моделирования; навыками интерпретации полученных данных; навыками экспериментальных исследований и методами анализа материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; навыками обработки результатов измерений и расчетов, навыками написания отчетов;

Согласована на портале № 84178

ПК-2. Готов проводить экспериментальные исследования по синтезу и анализу материалов и компонентов нано- и микросистемной техники	ПК-2.1. Знает методы синтеза наноматериалов и компонентов	знает методы синтеза наноматериалов и компонентов; физико-химические и технологические основы процессов производства изделий микро- и наноэлектроники, типовые технологические процессы их изготовления; принципы организации базовых технологических процессов создания компонентов микро- и наносистемной техники; базовое контрольно-измерительное оборудование, современное технологическое оборудование, используемое в производстве материалов и компонентов микро- и наносистемной техники;
	ПК-2.2. Умеет выбрать и применить метод анализа материалов и компонентов микро- и наносистемной техники	умеет использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных при проведении различных исследований; выбирать методику синтеза и анализа материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; систематизировать результаты исследований параметров и характеристик приборов, устройств; уметь выбирать оптимальные технологические процессы, их последовательности и контрольно-измерительные операции для производства изделий электронной техники; осуществлять операционный контроль производства материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; выбирать технологическое оборудование для конкретного применения; выбирать технологическое оборудование для конкретного применения
	ПК-2.3. Владеет основными методиками постановки и проведения экспериментальных исследований	владеет навыками интерпретации полученных экспериментальных данных; навыками экспериментальных исследований и методами анализа материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; навыками обработки результатов измерений и расчетов, навыками написания отчетов; навыками реализации современных способов нанесения, удаления и модифицирования материалов при создании элементной базы микро- и наносистем; навыками работы на контрольно-измерительном оборудовании и приемами обработки результатов измерения; навыками работы на технологическом оборудовании, используемом в производстве электронной компонентной базы;

Согласована на портале № 84178

ПК-4. Готов к применению современных технологических процессов и технологического оборудования на этапах разработки и производства изделий микро- и наноэлектроники, твердотельной электроники и микросистемной техники	ПК-4.1. Знает основное технологическое оборудование для производства изделий микро- и наноэлектроники, твердотельной электроники и микросистемной техники	знает физико-химические и технологические основы процессов производства изделий микро- и наноэлектроники, типовые технологические процессы их изготовления; принципы организации базовых технологических процессов создания компонентов микро- и наносистемной техники; базовое контрольно-измерительное оборудование, основы метрологии, основные методы и средства измерения физических величин, приемы обработки и представления экспериментальных данных; современное технологическое оборудование, используемое в производстве материалов и компонентов микро- и наносистемной техники; современные технологические процессы и оборудование, используемые на этапах разработки и производства изделий микро- и наноэлектроники, твердотельной электроники и микросистемной техники
	ПК-4.2. Умеет обосновывать выбор технологического процесса и оборудования для его реализации	уметь выбирать оптимальные технологические процессы, их последовательности и контрольно-измерительные операции для производства изделий электронной техники; осуществлять операционный контроль производства материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; выбирать технологическое оборудование для конкретного применения;
	ПК-4.3. Владеет навыками практической работы на технологическом оборудовании	навыками реализации современных способов нанесения, удаления и модифицирования материалов при создании элементной базы микро- и наносистем; навыками работы на контрольно-измерительном оборудовании и приемами обработки результатов измерения; навыками работы на технологическом оборудовании, используемом в производстве электронной компонентной базы; практическими навыками работы на оборудовании, используемом в производстве микро- и наноэлектроники, твердотельной электроники и микросистемной техники

4. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем и на самостоятельную работу обучающихся

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц, 144 академических часов.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам учебной деятельности представлено в таблице 4.1.

Согласована на портале № 84178

Таблица 4.1 – Трудоемкость дисциплины по видам учебной деятельности

Виды учебной деятельности	Всего часов	Семестры
		7 семестр
Контактная аудиторная работа обучающихся с преподавателем, всего	68	68
Лекционные занятия	26	26
Практические занятия	26	26
Лабораторные занятия	16	16
Самостоятельная работа обучающихся, в т.ч. контактная внеаудиторная работа обучающихся с преподавателем, всего	40	40
Подготовка к контрольной работе	7	7
Подготовка к тестированию	7	7
Написание отчета по практическому занятию (семинару)	10	10
Подготовка к лабораторной работе, написание отчета	16	16
Подготовка и сдача экзамена	36	36
Общая трудоемкость (в часах)	144	144
Общая трудоемкость (в з.е.)	4	4

5. Структура и содержание дисциплины

5.1. Разделы (темы) дисциплины и виды учебной деятельности

Структура дисциплины по разделам (темам) и видам учебной деятельности приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Разделы (темы) дисциплины и виды учебной деятельности

Названия разделов (тем) дисциплины	Лек. зан., ч	Прак. зан., ч	Лаб. раб.	Сам. раб., ч	Всего часов (без экзамена)	Формируемые компетенции
7 семестр						
1 Тенденция развития современной кремниевой технологии микро- и наноэлектроники	1	-	-	2	3	ПК-4
2 Субмикронная фотолитография	2	2	-	4	8	ПК-1, ПК-2, ПК-4
3 Пучковые методы литографии	6	8	-	5	19	ПК-1, ПК-2, ПК-4
4 Ионное легирование полупроводников	6	8	-	5	19	ПК-1, ПК-2, ПК-4
5 Ионное и плазмохимическое травление микро- и наноструктур	5	4	8	7	24	ПК-1, ПК-2, ПК-4
6 Осаждение металлов и диэлектриков. Планаризация рельефа	4	-	4	6	14	ПК-1, ПК-2, ПК-4
7 Технологические маршруты изготовления кремниевых ИС	2	4	4	11	21	ПК-1, ПК-2, ПК-4
Итого за семестр	26	26	16	40	108	
Итого	26	26	16	40	108	

5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

Содержание разделов (тем) дисциплины (в т.ч. по лекциям) приведено в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Содержание разделов (тем) дисциплины (в т.ч. по лекциям)

Согласована на портале № 84178

Названия разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплины (в т.ч. по лекциям)	Трудоемкость (лекционные занятия), ч	Формируемые компетенции
7 семестр			
1 Тенденция развития современной кремниевой технологии микро- и наноэлектроники	Международная технологическая дорожная карта для полупроводникового производства. Закон Мура.	1	ПК-4
	Итого	1	
2 Субмикронная фотолитография	Основные понятия и тенденции. Иммерсионная литография КУФ диапазона. Литография ЭУФ диапазона. Импринтинг	2	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	2	
3 Пучковые методы литографии	Электронно-лучевые установки. Параметры установок. Расчеты диаметра сфокусированного луча. Рассеяние пучка электронов в резисте. Время экспонирования. Разрешающая способность электронно-лучевой литографии. Ионная литография. Рентгенолитография	6	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	6	
4 Ионное легирование полупроводников	Технология ионного легирования. Пробеги ионов в аморфных веществах. Профили распределения концентрации внедренных ионов в аморфных и монокристаллических мишенях. Радиационные дефекты при ионном легировании. Отжиг дефектов. Быстрый термический отжиг. Новые методы импульсного отжига. Области применения ионного легирования.	6	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	6	
5 Ионное и плазмохимическое травление микро- и наноструктур	Классификация процессов. Основные параметры травления. Физика ионного травления. Разрешающая способность ионно-лучевого травления. Плазмохимическое травление (ПХТ). Модель и методы ПХТ	5	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	5	

Согласована на портале № 84178

6 Осаждение металлов и диэлектриков. Планаризация рельефа	Атомно-слоевое осаждение из газовой фазы. Ионное и ионно-плазменное осаждение тонких слоев диоксида кремния, нитрида кремния, нитрида алюминия, кремния и металлов. Ионно-стимулированное, ионно-лучевое напыление тонких пленок. Основные понятия и тенденции развития. Технология химико-механической планаризации	4	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	4	
7 Технологические маршруты изготовления кремниевых ИС	Основные понятия и тенденции развития. Инженерия межуровневого диэлектрика и межуровневой разводки. Технологический маршрут	2	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	2	
Итого за семестр		26	
Итого		26	

5.3. Практические занятия (семинары)

Наименование практических занятий (семинаров) приведено в таблице 5.3.

Таблица 5.3. – Наименование практических занятий (семинаров)

Названия разделов (тем) дисциплины	Наименование практических занятий (семинаров)	Трудоемкость, ч	Формируемые компетенции
7 семестр			
2 Субмикронная фотолитография	Субмикронная фотолитография	2	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	2	
3 Пучковые методы литографии	Электронно-лучевая литография	8	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	8	
4 Ионное легирование полупроводников	Ионная имплантация в технологии СБИС	8	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	8	
5 Ионное и плазмохимическое травление микро- и наноструктур	Ионно-лучевое травление микро- и наноструктур	4	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	4	
7 Технологические маршруты изготовления кремниевых ИС	Маршрут изготовления СБИС	4	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	4	
Итого за семестр		26	
Итого		26	

5.4. Лабораторные занятия

Наименование лабораторных работ приведено в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Наименование лабораторных работ

Названия разделов (тем) дисциплины	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость, ч	Формируемые компетенции
7 семестр			

Согласована на портале № 84178

5 Ионное и плазмохимическое травление микро- и наноструктур	Исследование процессов травления микро- и наноструктур	8	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	8	
6 Осаждение металлов и диэлектриков. Планаризация рельефа	Формирование межэлементной щелевой изоляции в кремниевой наноэлектронике	4	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	4	
7 Технологические маршруты изготовления кремниевых ИС	Исследование процессов формирования Т-образного затвора p-HEMT транзистора	4	ПК-1, ПК-2, ПК-4
	Итого	4	
Итого за семестр		16	
Итого		16	

5.5. Курсовой проект / курсовая работа

Не предусмотрено учебным планом

5.6. Самостоятельная работа

Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формируемые компетенции представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6. – Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формируемые компетенции

Названия разделов (тем) дисциплины	Виды самостоятельной работы	Трудоемкость, ч	Формируемые компетенции	Формы контроля
7 семестр				
1 Тенденция развития современной кремниевой технологии микро- и наноэлектроники	Подготовка к контрольной работе	1	ПК-4	Контрольная работа
	Подготовка к тестированию	1	ПК-4	Тестирование
	Итого	2		
2 Субмикронная фотолитография	Подготовка к контрольной работе	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа
	Подготовка к тестированию	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Тестирование
	Написание отчета по практическому занятию (семинару)	2	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Отчет по практическому занятию (семинару)
	Итого	4		

Согласована на портале № 84178

3 Пучковые методы литографии	Подготовка к контрольной работе	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа
	Подготовка к тестированию	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Тестирование
	Написание отчета по практическому занятию (семинару)	3	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Отчет по практическому занятию (семинару)
	Итого	5		
4 Ионное легирование полупроводников	Подготовка к контрольной работе	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа
	Подготовка к тестированию	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Тестирование
	Написание отчета по практическому занятию (семинару)	3	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Отчет по практическому занятию (семинару)
	Итого	5		
5 Ионное и плазмохимическое травление микро- и наноструктур	Подготовка к контрольной работе	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа
	Подготовка к лабораторной работе, написание отчета	4	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Лабораторная работа
	Подготовка к тестированию	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Тестирование
	Написание отчета по практическому занятию (семинару)	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Отчет по практическому занятию (семинару)
	Итого	7		
6 Осаждение металлов и диэлектриков. Планаризация рельефа	Подготовка к контрольной работе	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа
	Подготовка к лабораторной работе, написание отчета	4	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Лабораторная работа
	Подготовка к тестированию	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Тестирование
	Итого	6		

Согласована на портале № 84178

7 Технологические маршруты изготовления кремниевых ИС	Подготовка к контрольной работе	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа
	Подготовка к лабораторной работе, написание отчета	8	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Лабораторная работа
	Подготовка к тестированию	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Тестирование
	Написание отчета по практическому занятию (семинару)	1	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Отчет по практическому занятию (семинару)
	Итого	11		
Итого за семестр		40		
	Подготовка и сдача экзамена	36		Экзамен
Итого		76		

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

Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий представлено в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий

Формируемые компетенции	Виды учебной деятельности				Формы контроля
	Лек. зан.	Прак. зан.	Лаб. раб.	Сам. раб.	
ПК-1	+	+	+	+	Контрольная работа, Лабораторная работа, Отчет по практическому занятию (семинару), Тестирование, Экзамен
ПК-2	+	+	+	+	Контрольная работа, Лабораторная работа, Отчет по практическому занятию (семинару), Тестирование, Экзамен
ПК-4	+	+	+	+	Контрольная работа, Лабораторная работа, Отчет по практическому занятию (семинару), Тестирование, Экзамен

6. Рейтинговая система для оценки успеваемости обучающихся

6.1. Балльные оценки для форм контроля

Балльные оценки для форм контроля представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Балльные оценки

Формы контроля	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
7 семестр				
Контрольная работа	10	10	10	30
Лабораторная работа	0	0	16	16
Тестирование	0	0	10	10
Отчет по практическому занятию (семинару)	5	5	4	14

Согласована на портале № 84178

Экзамен				30
Итого максимум за период	15	15	40	100
Нарастающим итогом	15	30	70	100

6.2. Пересчет баллов в оценки за текущий контроль

Пересчет баллов в оценки за текущий контроль представлен в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Пересчет баллов в оценки за текущий контроль

Баллы на дату текущего контроля	Оценка
≥ 90% от максимальной суммы баллов на дату ТК	5
От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату ТК	4
От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату ТК	3
< 60% от максимальной суммы баллов на дату ТК	2

6.3. Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку представлен в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Оценка	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)

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература

1. Технология кремниевой наноэлектроники : учебное пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей, Е. В. Анищенко ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - 2-е изд. - Томск : ТУСУР, 2015. - 319 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 29 экз.).

2. Технология СБИС: учебное пособие / Т.И.Данилина, В.А.Кагадей , Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра физической электроники. - Томск : ТУСУР, 2007. - 287 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 48 экз.).

3. 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). - Томск : ТУСУР, 2005. - 316 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 99 экз.).

7.2. Дополнительная литература

1. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: учебное пособие для вузов: в 2 ч. / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. / Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М.А.Королев, Т.Ю.Крупкина, М.А.Ревелева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 397 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 10 экз.).

Согласована на портале № 84178

2. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: учебное пособие для вузов: в 2 ч. / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. / Ч. 2: Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / М.А.Королев [и др.]. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 423 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 35 экз.).

3. Оборудование для создания и исследования свойств объектов наноэлектроники: Учебное пособие / И. А. Чистоедова, Т. И. Данилина - 2011. 98 с. [Электронный ресурс]: — Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/547.

7.3. Учебно-методические пособия

7.3.1. Обязательные учебно-методические пособия

1. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе / И. А. Чистоедова, Т. И. Данилина - 2018. 61 с. [Электронный ресурс]: — Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/7944.

2. Технология кремниевой наноэлектроники: Методические указания по выполнению лабораторных работ для подготовки студентов по направлениям 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» / И. А. Чистоедова, Т. И. Данилина - 2025. 68 с. [Электронный ресурс]: — Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/11234.

7.3.2. 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.

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

При изучении дисциплины рекомендуется обращаться к современным базам данных, информационно-справочным и поисковым системам, к которым у ТУСУРа открыт доступ: https://lib.tusur.ru/ru/resursy/bazy-dannyh.

8. Материально-техническое и программное обеспечение дисциплины

8.1. 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 достаточным количеством посадочных мест для учебной группы, оборудованная доской и стандартной учебной мебелью. Имеются мультимедийное оборудование и учебно-наглядные пособия, обеспечивающие тематические иллюстрации по лекционным разделам дисциплины.

8.2. Материально-техническое и программное обеспечение для практических занятий

Лаборатория физики конденсированного состояния и материалов электронной техники: учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для курсового проектирования (выполнения курсовых работ), помещение для проведения групповых и индивидуальных консультаций, помещение для проведения текущего

Согласована на портале № 84178

контроля и промежуточной аттестации; 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 119 ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Лабораторные макеты: «Температурные свойства ферромагнитных материалов», «Температурные свойства проводящих материалов», «Объемное и поверхностное сопротивление изоляционных материалов», «Пробой тонкопленочных конденсаторов (ТПК)», «Температурная зависимость проводимости диэлектриков», «Фотоэлектрические свойства полупроводниковых материалов», «Определение ширины запрещенной зоны полупроводников», «Определение термо-ЭДС полупроводников», «Эффект Холла», «Эффект Пельтье».
- Лабораторное оборудование и приборы: измеритель Е7-8 (2 шт.), вольтметр В7-22А (5 шт.), амперметр Ф-195, М-253 (2 шт.), источник постоянного тока Б5-47, электрометр В7Э-42, мультиметр В7-22А (2 шт.), измеритель иммитанса Е7-20, тераомметр Е6-13, печь лабораторная (2 шт.), прибор для исследования пробоя ТПК, лабораторный стенд СФП-5 (2 шт.), вольтметр В7-26, вольтметр цифровой Ф4214, вольтметр Ф238,

источник постоянного тока Б5-47, измеритель иммитанса Е7-20;
- Компьютерные лабораторные работы (4 шт.);
- Компьютер Intel(R) Core (TM)2 CPU (4 шт.);
- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение:
- Free Pascal;
- LibreOffice;
- Microsoft Visual Studio 2010;
- PDF-XChange Viewer;
- PTC Mathcad 13, 14;
- Windows XP;

8.3. Материально-техническое и программное обеспечение для лабораторных работ

Учебная аудитория: учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа; 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 124 ауд.

Описание имеющегося оборудования:
- Компьютер Intel(R) Core (TM)2 CPU (13 шт.);
- Проектор Benq;
- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение:
- LibreOffice;
- Microsoft Windows 7;
- PDF-XChange Viewer;
- PascalABC;
- Виртуальная лабораторная работа «Исследование динамических характеристик кантилевера»;
- Виртуальная лабораторная работа «Исследование конструкции и характеристик струнного акселерометра»;
- Виртуальная лабораторная работа «Исследование межэлементной щелевой изоляции в кремниевой наноэлектронике»;
- Виртуальная лабораторная работа «Исследование процессов травления микро- и наноструктур»;
- Виртуальная лабораторная работа «Исследование процессов формирования Т-образного затвора p-HEMT транзистора»;

8.4. Материально-техническое и программное обеспечение для самостоятельной работы

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

Согласована на портале № 84178

- 634050, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 40, 101 ауд.;
- 634045, Томская область, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146, 107 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 47, 126 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 130 ауд.

Описание имеющегося оборудования:
- учебная мебель;
- компьютеры;
- компьютеры подключены к сети «Интернет» и обеспечивают доступ в электронную информационно-образовательную среду ТУСУРа.

Перечень программного обеспечения:
- Microsoft Windows;
- OpenOffice;
- Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows;
- 7-Zip;
- Google Chrome.

8.5. 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 звукоусиливающей 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 зрения** 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.

9. Оценочные материалы и методические рекомендации по организации изучения дисциплины

9.1. Содержание оценочных материалов для текущего контроля и промежуточной аттестации

Для оценки степени сформированности и уровня освоения закрепленных за дисциплиной компетенций используются оценочные материалы, представленные в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Формы контроля и оценочные материалы

Названия разделов (тем) дисциплины	Формируемые компетенции	Формы контроля	Оценочные материалы (ОМ)
1 Тенденция развития современной кремниевой технологии микро- и наноэлектроники	ПК-4	Контрольная работа	Примерный перечень вариантов (заданий) контрольных работ
		Тестирование	Примерный перечень тестовых заданий
		Экзамен	Перечень экзаменационных вопросов

Согласована на портале № 84178

2 Субмикронная фотолитография	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа	Примерный перечень вариантов (заданий) контрольных работ
		Тестирование	Примерный перечень тестовых заданий
		Экзамен	Перечень экзаменационных вопросов
		Отчет по практическому занятию (семинару)	Темы практических занятий
3 Пучковые методы литографии	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа	Примерный перечень вариантов (заданий) контрольных работ
		Тестирование	Примерный перечень тестовых заданий
		Экзамен	Перечень экзаменационных вопросов
		Отчет по практическому занятию (семинару)	Темы практических занятий
4 Ионное легирование полупроводников	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа	Примерный перечень вариантов (заданий) контрольных работ
		Тестирование	Примерный перечень тестовых заданий
		Экзамен	Перечень экзаменационных вопросов
		Отчет по практическому занятию (семинару)	Темы практических занятий
5 Ионное и плазмохимическое травление микро- и наноструктур	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа	Примерный перечень вариантов (заданий) контрольных работ
		Лабораторная работа	Темы лабораторных работ
		Тестирование	Примерный перечень тестовых заданий
		Экзамен	Перечень экзаменационных вопросов
		Отчет по практическому занятию (семинару)	Темы практических занятий

Согласована на портале № 84178

6 Осаждение металлов и диэлектриков. Планаризация рельефа	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа	Примерный перечень вариантов (заданий) контрольных работ
		Лабораторная работа	Темы лабораторных работ
		Тестирование	Примерный перечень тестовых заданий
		Экзамен	Перечень экзаменационных вопросов
7 Технологические маршруты изготовления кремниевых ИС	ПК-1, ПК-2, ПК-4	Контрольная работа	Примерный перечень вариантов (заданий) контрольных работ
		Лабораторная работа	Темы лабораторных работ
		Тестирование	Примерный перечень тестовых заданий
		Экзамен	Перечень экзаменационных вопросов
		Отчет по практическому занятию (семинару)	Темы практических занятий

Шкала оценки сформированности отдельных планируемых результатов обучения по дисциплине приведена в таблице 9.2.

Таблица 9.2 – Шкала оценки сформированности планируемых результатов обучения по дисциплине

Оценка	Баллы за ОМ	Формулировка требований к степени сформированности планируемых результатов обучения		
		знать	уметь	владеть
2 (неудовлетворительно)	< 60% от максимальной суммы баллов	отсутствие знаний или фрагментарные знания	отсутствие умений или частично освоенное умение	отсутствие навыков или фрагментарные применение навыков
3 (удовлетворительно)	от 60% до 69% от максимальной суммы баллов	общие, но не структурированные знания	в целом успешно, но не систематически осуществляемое умение	в целом успешное, но не систематическое применение навыков
4 (хорошо)	от 70% до 89% от максимальной суммы баллов	сформированные, но содержащие отдельные проблемы знания	в целом успешное, но содержащие отдельные пробелы умение	в целом успешное, но содержащие отдельные пробелы применение навыков

Согласована на портале № 84178

5 (отлично)	≥ 90% от максимальной суммы баллов	сформированные систематические знания	сформированное умение	успешное и систематическое применение навыков

Шкала комплексной оценки сформированности компетенций приведена в таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Шкала комплексной оценки сформированности компетенций

Оценка	Формулировка требований к степени компетенции
2 (неудовлетворительно)	Не имеет необходимых представлений о проверяемом материале или Знать на уровне **ориентирования**, представлений. Обучающийся знает основные признаки или термины изучаемого элемента содержания, их отнесенность к определенной науке, отрасли или объектам, узнает в текстах, изображениях или схемах и знает, к каким источникам нужно обращаться для более детального его усвоения.
3 (удовлетворительно)	Знать и уметь на **репродуктивном** уровне. Обучающихся знает изученный элемент содержания репродуктивно: произвольно воспроизводит свои знания устно, письменно или в демонстрируемых действиях.
4 (хорошо)	Знать, уметь, владеть на **аналитическом** уровне. Зная на репродуктивном уровне, указывать на особенности и взаимосвязи изученных объектов, на их достоинства, ограничения, историю и перспективы развития и особенности для разных объектов усвоения.
5 (отлично)	Знать, уметь, владеть на **системном** уровне. Обучающийся знает изученный элемент содержания системно, произвольно и доказательно воспроизводит свои знания устно, письменно или в демонстрируемых действиях, учитывая и указывая связи и зависимости между этим элементом и другими элементами содержания дисциплины, его значимость в содержании дисциплины.

9.1.1. Примерный перечень тестовых заданий

1. Что представляет собой проецированный пробег ионов в твердом теле?
   а) полный путь иона;
   б) проекция полного пути на направление первоначального движения иона (направление x);
   в) проекция пути на направление y;
   г) боковое рассеяния.
2. Глубина залегания p-n перехода с увеличением дозы облучения:
   а) не изменяется; б) возрастает; в) уменьшается г) сначала уменьшается, затем увеличивается.
3. Глубина залегания p-n перехода с увеличением энергии ионов:
   а) не изменяется; б) возрастает; в) сначала увеличивается, затем уменьшается ; г) уменьшается.
4. При низкотемпературном отжиге радиационных дефектов глубина залегания p-n перехода:
   а) не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается; г). сначала уменьшается, затем увеличивается.
5. Сферическая аберрация обусловлена:
   а) действием фокусирующего поля линзы; б) разбросом скоростей электронов; в) дифракцией; г) температурой подложки
6. Хроматическая аберрация обусловлена:
   а) действием фокусирующего поля линз; б) разбросом скоростей электронов; в) дифракцией; г) температурой подложки

Согласована на портале № 84178

7. Для идеального изотропного травления показатель анизотропии:
   а) равен 1; б) больше 1; в) меньше 1; г) равен 100.
8. Плазмохимическое травление 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;
   г) физического распыления ионами инертного газа в плазме.
9. 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.
10. 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.

9.1.2. Перечень экзаменационных вопросов

1. Области применения имплантации
2. Чем определяется время экспонирования при электронно-лучевой литографии?
3. Субмикронная фотолитография
4. Модель ПХТ. Влияние температуры подложки на процесс травления
5. Каналирование ионов
6. Синтез материалов с помощью ионной имплантации (оксиды, силициды)
7. Разрешающая способность электронно-лучевой литографии
8. Сухое травление: плазменное (ПХИ и РИД) и ионно-пучковое травление. Типы и особенности процессов
9. Пробеги ионов в твердых телах
10. Электронно-оптическая система ЭЛУ
11. Субмикронная проекционная фотолитография
12. Механизмы энергетических потерь при ионном легировании
13. Механизмы ионного травления. Параметры
14. Технология формирования структур «кремний на изоляторе» с помощью ионной

Согласована на портале № 84178

имплантации
15. Формирование электронных лучей субмикронных размеров
16. Чем определяется длина волны экспонирующего излучения в электронно-лучевой литографии?
17. Влияние поперечной составляющей тепловой скорости электронов на разрешающую способность электронной литографии
18. Радиационные дефекты. Образование аморфной фазы. Использование радиационных дефектов на практике
19. Быстрый термический отжиг. Области применения
20. Характеристики методов травления (жидкостное, ионное, плазмохимическое)
21. Распределение внедренной примеси по глубине при ионной имплантации. Образование p-n перехода
22. Методы импульсного отжига
23. Взаимодействие электронов с резистом. Энергетические потери. Рассеяние электронов
24. Способы формирования супермелкозалегающих p-n переходов
25. Чему равна селективность травления, если скорость травления фоторезиста в два раза больше скорости травления подложки?

9.1.3. Примерный перечень вариантов (заданий) контрольных работ

1. Вариант 1
   1. Как получается рисунок при последовательной ЭЛЛ.
   2. Каким образом для электронной пушки обеспечить малое значение угла схождения a (для уменьшения аберраций) при достаточной Imax? Рассмотреть этот вопрос теоретически и практически.
   3. Представить механизмы рассеяния пучка электронов при электронно-лучевом экспонировании.

2. Вариант 2
   1. Показать на рисунке возникновение сферической аберрации в ЭЛУ.
   2. Как изменится ток на образец при уменьшении диаметра электронного пятна с 10 до 0,1 мкм, если при диаметре пятна 10 мкм ток оставляет 10-5 А?
   3. Рассмотреть причины возникновения разброса энергий электронов в электронном луче. Каким образом разброс энергий электронов ограничивает минимальный размер пятна электронного луча на мишени?

3. Вариант 3
   1. Показать на рисунке угол сходимости и положение кроссовера в электронно-лучевой установке.
   2. Изменение эффективных энергетических потерь оп глубине. Показать положение характерных точек.
   3. Позитивный и негативный эффекты при электронно-лучевом экспонировании.

4. Вариант 4
   1. Определить параметры, которые будут определять время ионной имплантации?
   2. Объяснить характер распределения примеси при ионной имплантации.
   3. Что такое точечные дефекты? Рассчитать концентрацию этих дефектов при бомбардировке мишени из кремния ионами бора с дозой 10^13 см^-2. Есм=15 эВ. Ядерные потери составляют 16 кэВ/мкм.

5. Вариант 5
   1. Что такое доза облучения?
   2. Зачем используется имплантация ионов бора различных масс?
   3. Представить профили концентрации акцепторной примеси, введенной имплантацией в полупроводник с исходной концентрацией N=const, при создании p-n перехода ионами низкой энергии; n-p-n структуры ионами высокой энергии, p-n перехода с постоянной концентрацией примеси в легированной области ионами разных энергий.

Согласована на портале № 84178

6. Вариант 6
   1. Дать понятие полного и проецированного пробегов.
   2. Способы управления xp-n при ионной имплантации.
   3. Технология загонки примеси при ионной имплантации. На что влияет боковое рассеяние ионов?

9.1.4. Темы практических занятий

1. Субмикронная фотолитография
2. Электронно-лучевая литография
3. Ионная имплантация в технологии СБИС
4. Ионно-лучевое травление микро- и наноструктур
5. Маршрут изготовления СБИС

9.1.5. Темы лабораторных работ

1. Исследование процессов травления микро- и наноструктур
2. Формирование межэлементной щелевой изоляции в кремниевой наноэлектронике
3. Исследование процессов формирования Т-образного затвора p-HEMT транзистора

9.2. Методические рекомендации

Учебный материал излагается в форме, предполагающей самостоятельное мышление студентов, самообразование. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Начать изучение дисциплины необходимо со знакомства с рабочей программой, списком учебно-методического и программного обеспечения. Самостоятельная работа студента включает работу с учебными материалами, выполнение контрольных мероприятий, предусмотренных учебным планом.

В процессе изучения дисциплины для лучшего освоения материала необходимо регулярно обращаться к рекомендуемой литературе и источникам, указанным в учебных материалах; пользоваться через кабинет студента на сайте Университета образовательными ресурсами электронно-библиотечной системы, а также общедоступными интернет-порталами, содержащими научно-популярные и специализированные материалы, посвященные различным аспектам учебной дисциплины.

При самостоятельном изучении тем следуйте рекомендациям:

– чтение или просмотр материала осуществляйте со скоростью, достаточной для индивидуального понимания и освоения материала, выделяя основные идеи; на основании изученного составить тезисы. Освоив материал, попытаться соотнести теорию с примерами из практики;

– если в тексте встречаются незнакомые или малознакомые термины, следует выяснить их значение для понимания дальнейшего материала;

– осмысливайте прочитанное и изученное, отвечайте на предложенные вопросы.

Студенты могут получать индивидуальные консультации, в т.ч. с использованием средств телекоммуникации.

По дисциплине могут проводиться дополнительные занятия, в т.ч. в форме вебинаров. Расписание вебинаров и записи вебинаров публикуются в электронном курсе / электронном журнале по дисциплине.

9.3. 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 9.4.

Таблица 9.4 – Дополнительные материалы оценивания для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Категории обучающихся	Виды дополнительных оценочных материалов	Формы контроля и оценки результатов обучения

Согласована на портале № 84178

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)
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, определяющимися исходя из состояния обучающегося на момент проверки

9.4. 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 № 84178

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФЭ
протокол № 172 от «16» 10 2025 г.

СОГЛАСОВАНО:

Должность	Инициалы, фамилия	Подпись
Заведующий выпускающей каф. ФЭ	Ю.В. Сахаров	Согласовано, dd1f7cbe-1ce6-48e6-b40d-074633a5bd8a
Заведующий обеспечивающей каф. ФЭ	Ю.В. Сахаров	Согласовано, dd1f7cbe-1ce6-48e6-b40d-074633a5bd8a
Начальник учебного управления	Г.А. Цой	Согласовано, 8a5745e4-63a0-4946-bbb0-ce4977ac113e

ЭКСПЕРТЫ:

Профессор, каф. ФЭ	Ю.В. Сахаров	Согласовано, dd1f7cbe-1ce6-48e6-b40d-074633a5bd8a
Доцент, каф. ФЭ	И.А. Чистоедова	Согласовано, 2114f42c-7cf2-4826-9f35-9a75ea4961b2

РАЗРАБОТАНО:

Доцент, каф. ФЭ	И.А. Чистоедова	Разработано, 2114f42c-7cf2-4826-9f35-9a75ea4961b2

Согласована на портале № 84178