

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Беспалов Владимир Александрович

Должность: Ректор МИЭТ

Дата подписания: 01.09.2023 15:02:18

Уникальный программный ключ:

ef5a4fe6ed0ffdf3f1a49d6ad1b49464dc1bf7354f736d70e8f0bca802b8d802

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

И.Г. Игнатова

«14» декабря 2020 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Моделирование технологических процессов»

Направление подготовки - 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Направленность (профиль) – «Интегральная электроника и нанoeлектроника»

Москва 2020

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций образовательных программ:

Компетенция ПК-5. Способен разрабатывать и исследовать технологию производства изделий микро- и нанoeлектроники различного функционального назначения

сформулирована на основе профессионального стандарта 40.040 «Инженер в области разработки цифровых библиотек стандартных ячеек и сложнофункциональных блоков».

Обобщенная трудовая функция В Разработка топологии, физического представления стандартных ячеек библиотеки.

Трудовая функция В/01.6 Размещение и соединение элементов электрических схем стандартных ячеек библиотеки

Подкомпетенции, формируемые в дисциплине	Задачи профессиональной деятельности	Индикаторы достижения подкомпетенций
ПК-5.МТП Способен выполнять расчеты режимов технологических процессов формирования полупроводниковых приборов средствами приборно-технологического моделирования	математическое моделирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования	Знания: основные физические явления и математическое описание процессов формирования элементов интегральных схем; принципы численного моделирования технологических процессов и математических моделей основных технологических операций интегральной электроники и нанoeлектроники; современные достижения отечественной и зарубежной науки и техники в области математического моделирования технологических процессов интегральной электроники и нанoeлектроники. Умения: осуществлять выбор моделей для численного моделирования процессов формирования основных интегральных элементов и наноструктур и проводить оценку параметров интегральной структуры. Опыт деятельности: по применению методов расчета

		режимов и исследования технологических процессов производства изделий микро- и наноэлектроники на базе программных средств численного моделирования
--	--	---

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина входит в часть, формируемую участниками образовательных отношений Блока 1 «Дисциплины (модули)» образовательной программы.

Входные требования к дисциплине:

Знания: дифференциальные уравнения, теория вероятностей и математическая статистика, численные методы; молекулярная теория газов, электромагнетизм, оптика, основы атомной физики; основные сведения о химических реакциях; классическая и квантовая статистика, квантовая механика; основные сведения о полупроводниковых, металлических и диэлектрических материалах, используемых в технологии формирования электронной компонентной базы и методах их создания; структура и симметрия кристаллов, основы зонной теории; основные технологические операции изготовления элементов интегральной микро- и наноэлектроники.

Умения: исследовать базовые технологические операции изготовления элементов СБИС.

Опыт деятельности: по разработке и исследованию технологии производства изделий микро- и наноэлектроники различного функционального назначения.

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Курс	Семестр	Общая трудоёмкость (ЗЕ)	Общая трудоёмкость (часы)	Контактная работа			Самостоятельная работа (часы)	Промежуточная аттестация
				Лекции (часы)	Лабораторные работы (часы)	Практические занятия (часы)		
3	6	4	144	16	32	-	60	Экз (36)

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ и наименование модуля	Контактная работа			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля
	Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия		
Модуль 1. Введение. Моделирование ионной имплантации	4	-	8	14	Выполнение и защита лабораторных работ
					Тест
Модуль 2. Методы моделирования термических процессов	6	-	20	26	Выполнение и защита лабораторных работ
					Тест
Модуль 3. Моделирование процессов травления/осаждения и фотолитографии	4	-	-	6	Тест
Модуль 4. Методы численного моделирования полупроводниковых приборов	2	-	4	14	Тест
					Сдача практикоориентированного задания

4.1. Лекционные занятия

№ модуля дисциплины	№ лекции	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
1	1	2	Предмет курса. Роль приборно-технологического моделирования в проектировании интегральных схем
	2	2	Ионная имплантация, механизмы торможения ионов. Теория ЛШШ, диффузионная модель Бирсака. Эффект каналирования. Системы координат при моделировании ионной имплантации. Моделирование ионной имплантации методом Монте-Карло. Аналитические аппроксимации распределения ионов. Функции Гаусса. Распределения Пирсона-IV. Аналитические аппроксимации распределения ионов, учитывающие эффект каналирования. Распределения постимплантационных дефектов. Особенности моделирования ионной имплантации в многослойных мишенях. Эффект распыления мишени.
2	3	2	Диффузия примесей, описание на макроскопическом и микроскопическом уровне. Основные механизмы диффузии примесей в кристаллической решетке. Связанная диффузия. Коэффициент диффузии, зависимость от температуры и концентрации носителей. Модель связанной диффузии, основные уравнения. Граничные и начальные условия в моделировании диффузии. Моделирование кластеризации примеси.
	4	2	Особенности диффузии различных типов примеси. Взаимное влияние примесей в процессе диффузии. TED –эффект в наноразмерных структурах. Моделирование диффузии в поликристаллическом кремнии. Роль флуктуаций и распределения межзеренных границ в наноразмерных структурах с поликремниевым затвором.
	5	2	Термическое окисление кремния. Модель Дила-Гроува, вывод основного уравнения. Константы линейного и параболического роста. Начальный этап процесса окисления. Механизмы возникновения механических напряжений. Механические напряжения в наноразмерных кремниевых структурах. Основные этапы численного моделирования процесса окисления. Влияние окислительной атмосферы на процесс диффузии. Моделирование диффузии в присутствии подвижных границ. Моделирование сегрегации примеси. Модель Массуда. Моделирование двумерного окисления. Силицидизация.
3	6	2	Физико-химические и геометрические модели травления/осаждения слоев. Алгоритм струны. Модель баллистического осаждения. Параметры моделей травления/осаждения.
	7	2	Основные этапы численного моделирования литографии. Расчет

№ модуля дисциплины	№ лекции	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
			изображения на поверхности фоторезиста. Расчет интенсивности освещения в пленке фоторезиста. Моделирование процесса проявления. Особенности моделирования литографических процессов при создании наноразмерных элементов.
4	8	2	Базовые уравнения численного моделирования приборов. Дрейфово-диффузионное приближение. Термодинамическая и гидродинамическая модели. Дискретизация базовых уравнений. Методы дискретизации. Проблемы устойчивости и сходимости численного решения. Физические параметры при численном моделировании приборов. Пределы и ограничения моделей в наноразмерной области.

4.2. Практические занятия

Не предусмотрены

4.3. Лабораторные занятия

№ модуля дисциплины	№ лабораторной работы	Объем занятий (часы)	Наименование работы
1	1-2	8	Моделирование процесса ионной имплантации примеси в кремний
2	3-4	8	Моделирование процесса окисления кремния
	5	4	Аналитические модели диффузии примеси
	6	4	Модели диффузии, активации и кластеризации
	7	4	Параметры и граничные условия для моделей диффузии
4	8	4	Выполнение практикоориентированного задания

4.4. Самостоятельная работа студентов

№ модуля дисциплины	Объем занятий (часы)	Вид СРС
1	8	Подготовка к выполнению и защите лабораторной работы
	6	Подготовка к тестированию
2	20	Подготовка к выполнению и защите лабораторных работ
	6	Подготовка к тестированию
3	6	Подготовка к тестированию
4	6	Подготовка к тестированию
	8	Подготовка к выполнению практикоориентированного задания

4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов)

Не предусмотрены

5. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Учебно-методическое обеспечение для самостоятельной работы студентов в составе УМК дисциплины (ОРИОКС// URL: , <http://orioks.miet.ru/>):

Методические указания студентам по изучению дисциплины «Моделирование технологических процессов»;

Модуль 1 «Введение. Моделирование ионной имплантации»

✓ Материалы для подготовки к лабораторным работам №1,2,3, для подготовки к тесту, контрольные вопросы к лекциям, лабораторным работам и экзамену, конспект лекций 1,2, презентации к лекциям.

Модуль 2 «Методы моделирования термических процессов»

✓ Материалы для подготовки к лабораторным работам №4,5, для подготовки к тесту, контрольные вопросы к лекциям, лабораторным работам и экзамену, конспект лекций 3,4,5, презентации к лекциям.

Модуль 3 «Моделирование процессов травления/осаждения и фотолитографии»

✓ Материалы для подготовки к лабораторной работе №6, контрольные вопросы к лекциям, лабораторным работам и экзамену, конспект лекций 6,7, презентации к лекциям.

Модуль 4 «Методы численного моделирования полупроводниковых приборов»

✓ Материалы для подготовки к лабораторным работам №7,8, для подготовки к тесту, контрольные вопросы к лекциям, лабораторным работам и экзамену, конспект лекции 8, презентация к лекции.

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Литература

1. Лабораторный практикум по курсу "Моделирование технологических процессов" / Е.А. Артамонова, А.Г. Балашов, А.С. Ключников [и др.]; Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ"; Под ред. Т.Ю. Крупкиной. - М. : МИЭТ, 2018. - 108 с.
2. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 1 : Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, М.А. Ревелева; Под ред. Ю.А. Чаплыгина. - 3-е изд., электронное. - М. : Бином. Лаборатория знаний, 2015. - 400 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/66309> (дата обращения: 09.02.2020). - ISBN 978-5-9963-2904-5
3. Моделирование перспективных элементов устройств интегральной наноэлектроники / Ю.А. Чаплыгин, Е.А. Артамонова, А.Г. Балашов [и др.]. - ISBN 978-5-94836-422-3 // Нанотехнологии в электронике. - М. : Техносфера, 2015. - С. 14-51
4. Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне [Текст] / Б.П. Вонг [и др.]; Пер. с англ. К.В. Юдинцева, под ред. Н.А. Шелепина. - М. : Техносфера, 2014. - 432 с. - ISBN 978-5-94836-377-6

Периодические издания

1. RUSSIAN MICROELECTRONICS. - : Springer, [2000] - . - URL: <http://link.springer.com/journal/11180> (дата обращения: 30.09.2020). - Режим доступа: для авториз. пользователей МИЭТ
2. Известия вузов. Электроника : Научно-технический журнал / М-во образования и науки РФ; МИЭТ; Гл. ред. Ю.А. Чаплыгин. - М. : МИЭТ, 1996 - .
3. IEEE Transactions on Electron Devices. - USA : IEEE, [б.г.]. - URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=16> (дата обращения: 14.06.2020). - Режим доступа: по подписке МИЭТ

7. ПЕРЕЧЕНЬ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ, ИНФОРМАЦИОННЫХ СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ

1. eLIBRARY.RU : Научная электронная библиотека : сайт. - Москва, 2000 - . - URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp> (дата обращения: 30.09.2020). - Режим доступа: для зарегистрир. Пользователей
2. SCOPUS : Библиографическая и реферативная база данных научной периодики : сайт. - URL: www.scopus.com/ (дата обращения: 30.09.2020). - Режим доступа: для авториз. пользователей МИЭТ

8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Освоение образовательной программы обеспечивается ресурсами электронной информационно-образовательной среды ОРИОКС <http://orioks.miet.ru>.

В ходе реализации обучения используются **смешанное обучение**, основанное на интеграции технологий традиционного и электронного обучения. Для взаимодействия студентов с преподавателем используются сервисы обратной связи: ОРИОКС «Домашние задания», электронная почта преподавателя. Информационно-коммуникативные технологии с использованием сети Интернет применяются для консультирования студентов, в том числе с использованием сервисов Zoom.

Применяются дистанционные образовательные технологии при проведении самостоятельной работы и выполнении заданий СРС с использованием выполненных в iSpring онлайн-модулей, размещенных в ОРИОКС.

Моделирование технологических процессов проводится методами численного моделирования в среде виртуального производства интегральных схем на базе программных средств TCAD Synopsys <http://www.synopsys.com>

Дисциплина может реализовываться с использованием дистанционного обучения. При дистанционном обучении проводятся *online* лекции и лабораторные занятия с использованием платформы Zoom, вся информация доступна для студентов через среду ОРИОКС.

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень программного обеспечения
Помещение для самостоятельной работы	Компьютерная техника с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду МИЭТ	Операционная система Microsoft Windows от 7 версии и выше, Microsoft Office Professional Plus или Open Office, браузер (Firefox, Google Chrome); Acrobat reader DC
Учебная аудитория	Мультимедийное оборудование	Операционная система Microsoft Windows от 7 версии и выше, Microsoft Office Professional Plus
Компьютерный класс	Компьютеры, сервер, сетевой принтер.	Операционные системы ОС LINUX, программное обеспечение TCAD Synopsys

10. ФОНДЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ/ПОДКОМПЕТЕНЦИЙ

ФОС по подкомпетенции ПК-5.МТП «Способен выполнять расчеты режимов технологических процессов формирования полупроводниковых приборов средствами приборно-технологического моделирования».

Фонд оценочных средств представлен отдельным документом и размещен в составе УМК дисциплины электронной информационной образовательной среды ОРИОКС// URL: <http://orioks.miet.ru/>.

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

11.1. Особенности организации процесса обучения

Содержание дисциплины состоит из четырех модулей, которые изучаются последовательно:

1. Введение. Моделирование ионной имплантации.

1.1 Предмет курса. Роль приборно-технологического моделирования в проектировании интегральных схем

1.2 Моделирование ионной имплантации, механизмы торможения ионов. Аналитические аппроксимации распределения ионов.

1.3 Моделирование процесса ионной имплантации примеси в кремний

2. Методы моделирования термических процессов.

2.1. Диффузия примесей в кремнии

2.2. Особенности диффузии различных типов примеси. TED –эффект в наноразмерных структурах.

2.3. Термическое окисление кремния. Основные этапы численного моделирования процесса окисления.

2.4. Моделирование процесса окисления кремния

2.5. Моделирование процесса диффузии примеси. Аналитические модели диффузии

2.6. Модели диффузии, активации-кластеризации, используемые в программе технологического моделирования Sentaurus Process

3. Моделирование процессов травления/осаждения и фотолитографии

3.1 Физико-химические и геометрические модели травления/осаждения слоев.

3.2 Моделирование процесса фотолитографии.

4. Методы численного моделирования полупроводниковых приборов

4.1 Базовые уравнения численного моделирования приборов.

Студенты, изучающие дисциплину, обязаны:

- освоить темы (освоение тем подтверждается сдачей тестов),
- выполнить все лабораторные работы,

- выполнить комплексное задание на расчет режимов технологических процессов формирования полупроводниковых приборов средствами приборно-технологического моделирования,
- принять участие в лекции – пресс-конференции с представлением результатов выполнения заданий СРС, отражающих опыт проектной деятельности.

В процессе изучения курса предполагается самостоятельная работа студента при подготовке к лекционным и лабораторным занятиям, комплексному заданию.

Практикоориентированное задание выполняется на последней лабораторной работе. Начинается с тестирования, по окончании которого необходимо выполнить пракоориентированное задание на моделирование технологического маршрута и определение параметров технологических операций. Отчет с результатами формируется на компьютере в соответствии с требованиями к отчету, изложенными в методических указаниях, и распечатывается для защиты. Защита проходит в виде опроса после проверки отчета.

По завершению изучения дисциплины предусмотрена промежуточная аттестация в виде экзамена.

11.2. Система контроля и оценивания

Для оценки успеваемости студентов по дисциплине используется накопительная балльная система.

Баллами оцениваются: выполнение каждого контрольного мероприятия в семестре (в сумме 57 баллов), активность в семестре (8 баллов) и сдача экзамена (35 баллов).

По сумме баллов выставляется итоговая оценка по предмету. Структура и график контрольных мероприятий доступен в ОРИОКС// URL: <http://orioks.miet.ru/>

РАЗРАБОТЧИК:

Профессор кафедры ИЭМС, д.т.н., проф. _____/Т.Ю. Крупкина/



Рабочая программа дисциплины «Моделирование технологических процессов» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» по направленности (профилю) «Интегральная электроника и нанoeлектроника» разработана в на кафедре ИЭМС и утверждена на заседании кафедры ИЭМС 26.11 2020 года, протокол № 5

Заведующий кафедрой ИЭМС  /Ю.А. Чаплыгин/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Рабочая программа согласована с Центром подготовки к аккредитации и независимой оценки качества

Начальник АНОК  / И.М. Никулина /

Рабочая программа согласована с библиотекой МИЭТ

Директор библиотеки  / Т.П. Филиппова /