

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Беспалов Владимир Александрович Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Должность: Ректор МИЭТ

Дата подписания: 01.09.2023 15:11:45 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

Уникальный программный ключ:

ef5a4fe6ed0ffdf3f1a49d6ad1b49464dc1bf7354f736d76c8f0bea882b8d602 «Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронной техники»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

И.Г. Игнатова

«14» августа 2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Моделирование технологических процессов»

Направление подготовки - 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Направленность (профиль) – «Квантовые приборы и нанoeлектроника»

Москва 2020

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций образовательных программ:

Компетенция ПК-1. Способен строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования

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

Обобщенная трудовая функция: Разработка электрических схем и характеристика стандартных ячеек библиотеки

Трудовые функции: А/01.6 «Разработка электрических схем стандартных ячеек библиотеки»

Подкомпетенции, формируемые в дисциплине	Задачи профессиональной деятельности	Индикаторы достижения подкомпетенций
ПК-1.МТП Способен выполнять расчеты режимов технологических процессов формирования полупроводниковых приборов средствами приборно-технологического моделирования	- анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования; - 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, является элективной.

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/осаждени я и фотолитографии	4	-	-	6	Тест
Модуль 4. Методы численного моделирования полупроводниковых приборов	2	-	4	14	Тест
					Сдача практикоориентированно го 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	4	Введение в среду приборно-технологического моделирования TCAD
	2-3	8	Моделирование процесса ионной имплантации примеси в кремний
2	4-5	8	Моделирование процесса окисления кремния
	6-7	8	Моделирование процесса диффузии примеси
4	8	4	Расчет режимов технологических процессов формирования полупроводниковых приборов средствами приборно-технологического моделирования

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	Операционная

Наименование специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень программного обеспечения
	оборудование	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-1.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 практикоориентированное 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, практическому заданию. Практикоориентированное задание на моделирование технологического маршрута и определение параметров технологических операций выполняется на последней лабораторной работе.

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 наноэлектроника» по направленности (профилю) «Квантовые приборы и наноэлектроника» 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 выпускающей кафедрой КФН

Заведующий кафедрой КФН

 / А.А. Горбачевич /

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 /