

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики
А.С. Батурин**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Моделирование технологических процессов микроэлектроники
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра микро- и наноэлектроники
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составили:

А.А. Шарапов

Е.С. Горнев, д-р техн. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры микро- и наноэлектроники 03.03.2023

Аннотация

Курс "Моделирование технологических процессов микроэлектроники" предусматривает изучение основных принципов моделирования технологических процессов наноэлектроники. Предметом рассмотрения являются основные математические модели и методы, положенные в основу моделирования технологических процессов, принципы оптимизации технологических процессов с использованием математического моделирования.

Содержание курса:

1. Жизненный цикл изделий микроэлектроники
2. Классификация технологических операций
3. Масштабирование проектных норм
4. Принципы формирования структур микроэлектроники
5. Производство кремниевых пластин
6. Эпитаксия
7. Окисление
8. Осаждение
9. Травление
10. Ионная имплантация
11. Фотолитография
12. BEOL и FEOL
13. Компьютерное моделирование микро- и наносистем
14. Программы схемотехнического моделирования
15. Приборные симуляторы

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Курс "Моделирование технологических процессов микроэлектроники" предусматривает изучение основных принципов моделирования технологических процессов наноэлектроники. Предметом рассмотрения являются основные математические модели и методы, положенные в основу моделирования технологических процессов, принципы оптимизации технологических процессов с использованием математического моделирования.

Задачи дисциплины

- изучение принципов моделирования технологических процессов;
- овладение навыками построения комплексных моделей с использованием программных средств;
- выработка опыта в самостоятельном исследовании фрагментов технологического маршрута микроэлектронного производства.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем

ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей
--	---

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные виды технологических процессов;
- основные математические модели технологических процессов;
- основы оптимизации технологических процессов.

уметь:

- проводить подготовку исходных данных для численного моделирования технологических процессов;
- оптимизировать математические модели технологических процессов;
- проводить обработку результатов моделирования.

владеть:

- методами обработки данных с помощью самостоятельно разработанных скриптов;
- современными методами научной визуализации;
- методами моделирования с использованием пакета TCAD.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Жизненный цикл изделий микроэлектроники	2			1
2	Классификация технологических операций	2			1
3	Масштабирование проектных норм	2			1
4	Принципы формирования структур микроэлектроники	2			1
5	Производство кремниевых пластин	2			1
6	Эпитаксия	2			1
7	Окисление	2			1
8	Осаждение	2			1
9	Травление	2			1
10	Ионная имплантация	2			1
11	Фотолитография	2			1
12	BEOL и FEOL	2			1
13	Компьютерное моделирование микро-и наносистем	2			1
14	Программы схемотехнического моделирования	2			1
15	Приборные симуляторы	2			1
Итого часов		30			15
Подготовка к экзамену		0 час.			

Общая трудоёмкость	45 час., 1 зач.ед.
--------------------	--------------------

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 8 (Весенний)

1. Жизненный цикл изделий микроэлектроники

Концепция (техническое задание), архитектура, разработка логики интегральных схем, разработка топологии, верификация, утверждение фотошаблонов, производство фотошаблонов, валидация, разработка технологического маршрута, исполнение технологических операций на производстве, корпусирование, тестирование, испытания, сертификация, запуск серии, эксплуатация

2. Классификация технологических операций

Формирование слоёв, профилирование, модификация свойств и метрологическое обеспечение.

3. Масштабирование проектных норм

Развитие технологий микроэлектроники. Эмпирические закономерности трендов микроэлектронной отрасли: закон Мура, закон масштабирования Деннарда

4. Принципы формирования структур микроэлектроники

Роль фотолитографии в современной микроэлектронной технологии. Механизмы проявления изображения в резисте

5. Производство кремниевых пластин

Выращивание монокристаллов кремния методом Чохральского. Очистка методом зонной плавки. Кристаллографическая ориентация кремниевых пластин

6. Эпитаксия

Автоэпитаксия. Гетероэпитаксия. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Физические основы технологической операции и моделирование

7. Окисление

Термическое окисление. Физические основы технологической операции и моделирование

8. Осаждение

Атомно-слоевое осаждение. Физические основы технологической операции и моделирование

9. Травление

Жидкостное, реактивно-ионное и плазмохимическое травление. Физические основы технологической операции и моделирование

10. Ионная имплантация

Ионная имплантация. Физические основы технологической операции и моделирование

11. Фотолитография

Фотолитография и электронная литография. Физические основы технологической операции и моделирование

12. BEOL и FEOL

Схемы BEOL и FEOL. Физические основы технологической операции и моделирование

13. Компьютерное моделирование микро- и наносистем

Понятие «макромодели». Практические примеры. Многообразие приборных симуляторов.

14. Программы схемотехнического моделирования

Граф электрической цепи, топологические матрицы. Метод узловых потенциалов. Анализ нелинейных резистивных цепей. Алгоритм функционирования PSPICE

15. Приборные симуляторы

Фундаментальная система уравнений в приборных симуляторах. Общая постановка задачи, вычислительные методы её решения, учет квантовых эффектов. Методы математического моделирования кинетических процессов

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).
Обеспечение самостоятельной работы: доступ в сеть Интернет.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. / пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
2. Яковлев В.Б. Вычислительная математика: учеб. пособие. – М.: МИЭТ, 2008. – 132 с.
3. Самарский А.А. Введение в численные методы: учеб. Пособие. – М.: Наука, 1972. – 272 с.
4. Боглаев Ю.П. Вычислительная математика и программирование: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1990. – 544 с.
5. Актуальные проблемы моделирования в системах автоматизированного схемотехнического проектирования. / под ред. А.И. Стемпковского. – М.: Наука, 2003. – 432 с.

Дополнительная литература

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука, 2001. – 320 с.
2. Краснощёков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: Фазис, 2000. – 284 с.
3. Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы. – М.: Фазис, 2000. – 144 с.
4. Блауберг И.В., Юдин Э.Г. Становление и сущность системного подхода. – М.: Наука, 1973. – 269 с.
5. Мороз А.И. Курс теории систем: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.
6. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / пер. с англ. – М.: Мир. – 418 с.
7. Сырчин В.К. САПР и моделирование технических систем: учеб. пособие. – М.: МИЭТ, 1997. – 304 с.
8. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
9. Емельянов В.В., Курейчик В.М., Курейчик В.В. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
10. Яковлев В.Б., Болгов В.А. Основы численных методов: учеб. пособие. – М.: МИЭТ, 2001. – 132 с.
11. Косарев В.И. 12 лекций по вычислительной математике: учеб. пособие, 2-е изд. – М.: МФТИ (Физматкнига), 2000. – 224 с.
12. Земсков В.Н., Хахалин С.Я. Метод сеток: методические указания. – М.: МИЭТ, 1998. – 64 с.
13. Ильин В.П. Методы и технологии конечных элементов / Сиб. отделение РАН, Ин-т вычислительной математики и математической геофизики. – Новосибирск: ИВМ и МГ СО РАН, 2007. – 731 с.
14. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологий и микроэлектроника. – М.: Техносфера, 2020. – 434 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Не предусмотрены

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, прослушавший курс лекций, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом; активное участие в обсуждении, выполнение практических задач;
- 2) понимания изучаемого материала, а не механического запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра микро- и нанoeлектроники
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчики:

А.А. Шарапов

Е.С. Горнев, д-р техн. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Моделирование технологических процессов микроэлектроники» обучающийся должен:

знать:

- основные виды технологических процессов;
- основные математические модели технологических процессов;
- основы оптимизации технологических процессов.

уметь:

- проводить подготовку исходных данных для численного моделирования технологических процессов;
- оптимизировать математические модели технологических процессов;
- проводить обработку результатов моделирования.

владеть:

- методами обработки данных с помощью самостоятельно разработанных скриптов;
- современными методами научной визуализации;
- методами моделирования с использованием пакета TCAD.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В начале каждой лекции проводится краткий опрос по теме предыдущего занятия.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Жизненный цикл изделий микроэлектроники
2. Классификация технологических операций
3. Масштабирование проектных норм
4. Принципы формирования структур микроэлектроники
5. Производство кремниевых пластин
6. Эпитаксия
7. Окисление
8. Осаждение

9. Травление
10. Ионная имплантация
11. Фотолитография
12. BEOL и FEOL
13. Компьютерное моделирование микро- и наносистем
14. Программы схемотехнического моделирования
15. Приборные симуляторы

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Оценка за семестр выставляется по результатам устного дифференцированного зачета. Опрос по билету не должен превышать одного астрономического часа.