

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
“ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)

УТВЕРЖДАЮ

Ректор **СПбГЭТУ**

_____ / Кутузов В. М. /

Программа

**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников
высшей школы по направлению**

“ Нанотехнологии для систем безопасности ”

на базе учебного курса

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ

ЭЛЕМЕНТОВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

(наименование учебного курса)

Цель: ознакомление с основами моделирования технологических процессов
наноэлектроники и приобретение соответствующих навыков.

Категория слушателей преподаватели и научные работники высшей школы

Примерный срок обучения 36 часов

Форма обучения с частичным отрывом от работы, дистанционно- очная

Режим занятий 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с основными принципами построения целостного технологического процесса и понятиями в области математического моделирования, изучение основных принципов моделирования технологических процессов наноэлектроники, освоение программного пакета Synopsys TCAD. Предметом рассмотрения являются основные математические модели и методы, положенные в основу моделирования технологических процессов, целостный технологический процесс и принципы оптимизации технологических процессов с использованием математического моделирования. Важным элементом дисциплины является выработка навыков проектирования технологических циклов производства устройств наноэлектроники с заданными электрофизическими параметрами.

Требования к уровню освоения учебного курса.

Преподаватели должны:

- Знать:
 - основные законы построения технологических процессов;
 - основные математические модели технологических процессов;
 - основы численного моделирования технологических процессов;
 - основы оптимизации технологических процессов с применением TCAD;
- Иметь навыки:
 - построения технологических процессов, численного моделирования технологических процессов в Sentaurus TCAD, оптимизации технологических процессов с применением TCAD;
- Иметь представление:
 - о влиянии разброса технологических параметров на приборные характеристики изделий нанoeлектроники, принципах построения численного эксперимента.

Научные работники должны:

- Знать:
 - основные законы построения технологических процессов;
 - основные математические модели технологических процессов;
 - основы численного моделирования технологических процессов;
 - основы оптимизации технологических процессов с применением TCAD;
- Иметь навыки:
 - построения технологических процессов, численного моделирования технологических процессов в Sentaurus TCAD, оптимизации технологических процессов с применением TCAD;
- Иметь представление:
 - о влиянии разброса технологических параметров на приборные характеристики изделий нанoeлектроники, принципах построения численного эксперимента.

Учебный курс «Моделирование технологических процессов формирования элементов нанoeлектроники» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объёмом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лабораторий в Санкт-Петербургском электротехническом университете.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса содержится необходимая информация для уяснения основ проектирования технологических процессов, принципов организации TCAD, необходимости использования программных продуктов на всех этапах разработки и оптимизации конструкции и технологии. Приводится описание математических моделей отдельных процессов нанотехнологии, основ численного моделирования технологических процессов, основных программных модулей пакета технологического моделирования Sentaurus TCAD.

Теоретическая часть учебного курса состоит из шести лекций:

Лекция 1. Целостное представление о технологическом процессе. Приборно-технологическое моделирование (TCAD). Метод конечных элементов.

Взаимовлияние операций в целостном технологическом процессе. Возможности и основные направления развития средств приборно-технологического моделирования. Задачи, решаемые с помощью Sentaurus TCAD, и основы моделирования технологического процесса. Метод конечных элементов.

Лекция 2. Математические модели технологических процессов.

Математические модели процессов диффузии, ионной имплантации и окисления кремния.

Лекция 3. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модуль Sentaurus Process.

Возможности Sentaurus Process и правила написания командного файла.

Лекция 4. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Ligament Layout Editor и Ligament Flow Editor.

Возможности Ligament Layout Editor и правила создания эскиза фотошаблонов. Возможности Ligament Flow Editor и правила создания модели технологического процесса.

Лекция 5. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Inspect и Tecplot.

Отображение результатов моделирования с помощью программных модулей Inspect и Tecplot SV.

Лекция 6. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Sentaurus Structure Editor, Sentaurus Device и Sentaurus Workbench. Построение эксперимента.

Возможности Structure Editor для моделирования структуры прибора. Возможности Sentaurus Device для получения приборных характеристик. Оболочка Sentaurus Workbench и ее использование для построения численного эксперимента.

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 18 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте www.nanoobr.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы и задания к курсу

«Моделирование технологических процессов формирования элементов нанoeлектроники»

Лекция 1. Целостное представление о технологическом процессе. Приборно-технологическое моделирование (TCAD). Метод конечных элементов

1. За счет чего снижается стоимость полупроводникового производства при использовании TCAD:

- а) за счет уменьшения числа экспериментов;
- б) за счет того, что отпадает необходимость ставить эксперименты в процессе разработки нового технологического процесса;
- в) за счет сокращения затраченного времени;
- г) за счет уменьшения стоимости обучения и подготовки персонала?

2. В каком виде представлены в TCAD физические модели:

- а) в виде системы алгебраических уравнений;
- б) в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений;
- в) в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями;
- г) в виде набора значений физических величин.

3. Чем определяется выбор размеров элементов сетки в методе конечных элементов:

- а) достижением приемлемой сходимости и точности расчета;
- б) затратами времени на вычисление;

- в) размерами и формой структуры, наличием и величиной градиентов физических параметров, наличием других неоднородностей структуры (например, интерфейсов);
- г) всеми перечисленными факторами в совокупности?

Лекция 2. Математические модели технологических процессов.

1. Процесс ионной имплантации в аморфном полупроводнике описывается с помощью распределения:

- а) распределение Гаусса;
- б) двойное сопряженное распределение Гаусса (асимметричное);
- в) распределение Гаусса с обобщенным экспоненциальным «хвостом»;
- г) распределение Пирсона-IV;
- д) распределение Пирсона-IV с линейно-экспоненциальным хвостом.

2. Наклон подложки относительно направления падения ионного пучка при проведении процесса ионной имплантации необходим для:

- а) предотвращения распыления материала с поверхности подложки;
- б) более равномерного распределения примеси в латеральном направлении;
- в) предотвращения явления каналирования ионов в монокристаллическом полупроводнике;
- г) уменьшения нагрева поверхности подложки.

3. Количество введенной в полупроводник примеси в процессах диффузии и ионной имплантации характеризуется:

- а) полным количеством атомов примеси;
- б) концентрацией примеси;
- в) дозой примеси;
- г) дозой активной примеси.

4. При окислении кремния скорость протекания процесса определяется:

- а) скоростью поставки окислителя к поверхности кремния;
- б) скоростью диффузии окислителя в слое окисла по направлению к границе окисел-кремний;
- в) скоростью протекания химической реакции на поверхности окисла;
- г) скоростью протекания химической реакции на границе окисел-кремний.

5. При моделировании процесса окисления кремния учитываются:

- а) зависимость скорости процесса от температуры;
- б) зависимость скорости процесса от парциального давления компонентов окисляющей среды;
- в) зависимость скорости процесса от ориентации подложки, механических напряжений и уровня легирования;
- г) от всех перечисленных факторов.

6. Сегрегация примеси - это:

- а) явление перераспределения примеси между окислом и полупроводником, происходящие при высокой температуре из-за различия растворимости и коэффициентов диффузии примеси в полупроводнике и окисле;
- б) встраивание атомов примеси в кристаллическую решетку полупроводника;
- в) обеднение примесью поверхности полупроводника, происходящие при его нагреве в инертной среде;
- г) перераспределение примеси в объеме полупроводника при высокой температуре.

Лекция 3. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модуль Sentaurus Process.

1. При моделировании геометрии структуры и сетки конечных элементов в SProcess координатная ось X направлена:
 - а) вдоль базового среза пластины;
 - б) перпендикулярно к поверхности вглубь пластины;
 - в) вдоль поверхности пластины перпендикулярно базовому срезу;
 - г) перпендикулярно от поверхности пластины.
2. Командному файлу для SProcess присваивается расширение:
 - а) cmd;
 - б) grd;
 - в) dat;
 - г) lyt.
3. Результаты моделирования сохраняются в:
 - а) графическом формате;
 - б) цифровом формате, пригодном только для обработки с помощью табличного процессора (такого, как Microsoft Excel);
 - в) цифровом формате, позволяющем получать графические 3D, 2D и 1D распределения физических величин;
 - г) цифровом формате, пригодном для обработки с помощью табличного процессора, а также позволяющем получать графические 3D, 2D и 1D распределения физических величин с помощью встроенных в программный пакет собственных модулей.

Лекция 4. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Ligament Layout Editor и Ligament Flow Editor.

1. При моделировании шаблонов координатная оси X и Y направлены:
 - а) X - вдоль базового среза пластины, Y – перпендикулярно ей в плоскости пластины;
 - б) X - перпендикулярно к поверхности вглубь пластины, Y – вдоль базового среза;
 - в) X -вдоль поверхности пластины перпендикулярно базовому срезу, Y - вдоль базового среза пластины;
 - г) X - вдоль поверхности пластины перпендикулярно базовому срезу, Y - перпендикулярно от поверхности пластины.
2. При рисовании шаблонов закрашенные области соответствуют:
 - а) участкам, которые должны быть закрыты маской;
 - б) участкам, которые должны быть открыты для воздействия;
 - в) в зависимости от заданного типа фоторезиста могут соответствовать закрытым либо открытым участкам.
3. При описании технологического процесса в **Ligament Flow Editor** используются:
 - а) только стандартные модули для описания отдельных технологических операций;
 - б) только модули, самостоятельно созданные пользователями для описания отдельных технологических операций;
 - в) стандартные и пользовательские модули для описания отдельных технологических операций;
 - г) стандартные и пользовательские модули для описания отдельных технологических операций, а также стандартные команды языка программирования высокого уровня, позволяющие управлять процессом моделирования.

Лекция 5. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Inspect и Tecplot.

1. Для визуализации двухкоординатных графиков в Sentaurus TCAD используется:
 - а) модуль Inspect;
 - б) модуль Tecplot;
 - в) внешние графические программы;
 - г) модули Inspect и Tecplot.
2. Профили распределения примесей, сохраненные в файле с расширением tdr, могут быть представлены в виде:
 - а) графиков;
 - б) цветовых полей;
 - в) таблиц данных;
 - г) функциональной зависимости.
3. При отображении графиков в программном модуле Inspect величины, значения которых откладываются по осям X и Y:
 - а) определяются автоматически в соответствии с порядком сохранения данных в файле с расширением plt;
 - б) по оси X всегда откладывается время, по оси Y – определяется пользователем;
 - в) задается пользователем;
 - г) по оси X всегда откладывается координата, по оси Y – определяется пользователем.

Лекция 6. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Sentaurus Structure Editor, Sentaurus Device и Sentaurus Workbench. Построение эксперимента.

1. Узлом эксперимента в Sentaurus Workbench называется:
 - а) ячейка, содержащая иконку с обозначением приложения;
 - б) ячейка, содержащая значение, которое присваивается параметру;
 - в) ячейка, содержащая имя параметра.
2. Численные значения параметрам, которые используются в эксперименте, присваиваются:
 - а) в момент заполнения таблицы эксперимента в Sentaurus Workbench;
 - б) при выполнении расчета;
 - в) при выполнении препроцессорной подготовки.
3. Серый цвет узла эксперимента обозначает:
 - а) «расчет выполнен»;
 - б) «расчет не проводился»;
 - в) «ошибка в расчете»;
 - г) «узел исключен из расчета».

Контрольные вопросы для проверки материала

1. Составьте сопроводительный лист технологического процесса производства КМОП структуры.
2. Использование приборно-технологического моделирования в разработке и производстве устройств электроники.

3. Метод конечных элементов.
4. Математические модели процесса диффузии.
5. Математические модели процесса ионной имплантации.
6. Математические модели процесса окисления.
7. Правила создания командного файла для моделирования технологического процесса в Sentaurus Process.
8. Построение эскиза шаблонов в Ligament Layout Editor.
9. Построение технологического процесса с помощью Ligament Flow Editor.
10. Отображение результатов моделирования в программных модулях Tecplot SV и Inspect.
11. Организация математического эксперимента в Sentaurus Workbench.
12. Основные принципы оптимизации технологических процессов нанозлектроники.
13. Основные приемы оптимизации конструкции приборов нанозлектроники.

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса на базе экспериментальных результатов и их обработки с применением знаний из дистанционной части курса.

Темы контрольных рефератов по курсу «Проблемы безопасности в nanoиндустрии»

1. Моделирование процессов диффузии.
2. Моделирование процессов ионной имплантации.
3. Моделирование процессов высокотемпературного окисления.
4. Моделирование процессов нанесения и удаления вещества.
5. Современное состояние средств приборно-технологического проектирования.
6. Численные методы в моделировании технологических процессов.
7. Основные способы реализации процессов нанесения вещества в нанотехнологии.
8. Основные способы реализации процессов удаления вещества в нанотехнологии.
9. Применение процессов планарной и изопланарной технологии ИС в нанотехнологии.
10. Процессы самоформирования в нанотехнологии.
11. Размерные эффекты и их учет в моделировании процессов и структур нанотехнологии.
12. Квантовые эффекты и их учет в моделировании процессов и структур нанотехнологии.

Учебно-тематический план

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение с	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные	Очный практикум или другое практическое задание	

			преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	вопросы		
	«Моделирование технологических процессов формирования элементов наноэлектроники»	36 ч.	15 ч.	3,0 ч.	18 ч.	1. Тесты для самотестирования 2. Контрольные вопросы (электронная зачётка)
1.	Лекция 1. Целостное представление о технологическом процессе. Приборно- технологическое моделирование (TCAD). Метод конечных элементов		2,5 ч.	0,5 ч.		
2.	Лекция 2. Математические модели технологических процессов.		2,5 ч.	0,5 ч.		
3.	Лекция 3. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модуль Sentaurus Process.		2,5 ч.	0,5 ч.		
4	Лекция 4. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Ligament Layout Editor и Ligament Flow Editor.		2,5 ч.	0,5 ч.		
5	Лекция 5. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Inspect и Tecplot.		2,5 ч.	0,5 ч.		
6	Лекция 6. Программный пакет Sentaurus TCAD. Модули Sentaurus Structure Editor, Sentaurus Device и Sentaurus Workbench. Построение эксперимента.		2,5 ч.	0,5 ч.		
Итоговый контроль			1. Тесты самотестирования	для 2. Контрольные вопросы (электронная зачётка)	3. Реферат	

Список литературы (основной и дополнительной), а также других видов учебно-методологических материалов и пособий, необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных дисков и др.).

Основная литература:

1. Чистяков Ю.Д., Райнова Ю.П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники.- М.- Металлургия.- 1979.- 408 с.
2. Норенков И.П., Маничев В.Б. «Основы теории и проектирования САПР». -М.: Высш.шк., 1990.
3. МОП СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти и др.; Пер. с англ. - М.: Радио и связь. 1988.
4. Бубенников А.И. Моделирование интегральных технологий, приборов и схем. - М.: Высшая школа, 1989.
5. Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Часть 1. М.- БИНОМ. Лаборатория знаний.- 2007.- 397 с.
6. Технология СБИС, под ред. С.Зи, пер. с англ. под ред. Чистякова Ю.Д., М., Мир, 1986.
7. Sentaurus Process User Guide X-2007.12, Synopsys, 2007.
8. Ligament User Guide X-2007.12, Synopsys, 2007.
9. Tecplot SV User Guide X-2007.12, Synopsys, 2007.
10. Inspect User Guide X-2007.12, Synopsys, 2007.
11. Sentaurus Device User Guide X-2007.12, Synopsys, 2007.
12. Sentaurus Structure Editor User Guide X-2007.12, Synopsys, 2007.
13. <http://www.alt-s.ru/>
14. <http://synopsys.com>

Дополнительная литература:

1. Попов В.Ф., Горин Ю.Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. Учеб. пособие - М.: Высшая школа, 1988, 300 с.
2. Курносков А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – Учебник для вузов - М.:Высшая школа, 1986
3. Барыбин А.А., Сидоров В.Г. Физико-технологические основы электроники. СПб.: Лань, 2001, 272 с.
4. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии: М.: Физматлит, 2007. 416 с.
5. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов: Учеб. пособие для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики», «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы».- М.- Высш. шк.- 1984.- 288 с.
6. В.В. Старостин Материалы и методы нанотехнологии: учебное пособие.- М.- БИНОМ. Лаборатория знаний.- 2008.- 431 с.