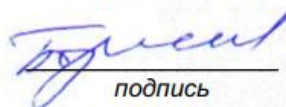


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
физики полупроводников и микроэлектроники


подпись

(Бормонтов Е.Н.)
расшифровка подписи

31.08.2024

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
по учебной дисциплине

ФТД.В.02 Системы приборно-технологического проектирования
Код и наименование дисциплины в соответствии с учебным планом

Код и наименование направления подготовки/специальности: 11.03.04

Электроника и наноэлектроника

Направленность (профиль) подготовки/специализация: _____

Интегральная электроника и наноэлектроника

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очная

Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: _____

физики полупроводников и микроэлектроники

Составители рабочей программы дисциплины, в том числе фонда оценоч-
ных средств по учебной дисциплине: Быкадорова Галина Владимировна

кандидат технических наук, доцент

(ФИО, ученая степень, ученое звание)

Учебный год: 2027-2028

Семестр(ы): 2

Освоение данной дисциплины направлено на формирование следующих компетенций

Компетенции		Индикаторы		Планируемые результаты обучения
Код	Наименование компетенции	Код(ы)	Наименование индикатора(ов)	
ПК-3	Способен выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники	ПК-3.3	Составляет технологический маршрут, разрабатывает порядок пооперационного выполнения работ и оформляет маршрутные карты изготовления изделий микроэлектроники	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - технологию работы на ПК в современных операционных средах, основные методы разработки алгоритмов и программ, структуры данных, используемые для разработки пооперационного выполнения работ и оформления процесса изготовления изделий микроэлектроники; <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - составлять технологический маршрут в соответствии с порядком пооперационного выполнения технологических операций; - оформлять маршрутные карты изготовления изделий микроэлектроники; - самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности знания и умения, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных со сферой деятельности; <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - современными системами компьютерного моделирования, оптимального проектирования и конструирования приборов, схем и устройств микро- и нанoeлектроники различного функционального назначения; - профессионально-профильными знаниями в области информационных технологий, использовании современных компьютерных сетей, программных продуктов и ресурсов Интернет для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами профильной подготовки; - программными продуктами оформления и представления результатов компьютерного моделирования изделий микроэлектроники;
ПК-7	Способен выполнять работы по технологической подго-	ПК-7.1	Выбирает необходимые параметры технологических процес-	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - параметры и режимы основных технологических процессов, используемых в производстве изде-

	<p>товке производства материалов и изделий электронной техники</p>		<p>сов производства изделий микроэлектроники</p>	<p>лий микроэлектроники;</p> <ul style="list-style-type: none"> - фундаментальные разделы физики полупроводников и твердотельной электроники, основ технологии электронной компонентной базы, необходимые для решения научно-исследовательских задач проектирования элементов ИС; - физические и математические модели приборно-технологического моделирования приборов, схем, устройств электроники и нано-электроники различного функционального назначения; - методы расчета, проектирования, конструирования и модернизации электронной компонентной базы с использованием систем автоматизированного проектирования и компьютерных средств; <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - строить простейшие физические и математические модели для приборно-технологического моделирования приборов, схем, устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения;
		<p>ПК-7.3</p>	<p>Решает технологические проблемы, возникающие в процессе производства изделий микроэлектроники</p>	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - базовые технологические процессы производства изделий микроэлектроники <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - разрабатывать физические и математические модели приборов и устройств микро- и наноэлектроники в соответствии с технологической документацией; - применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования приборов элементов ИС в соответствии с технологической документацией; <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - разрабатывать технологические маршруты изготовления приборов и устройств микро- и наноэлектроники низкой и средней сложности; <p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - методами разработки электронной компонентной базы и технологических процессов микроэлектроники; - методами математического моделирования приборов и технологических процессов с целью опти-

				мизации параметров изделий микроэлектроники низкой и средней сложности
--	--	--	--	--

Перечень заданий для оценки уровня освоения дисциплины:

- 1) тестовые задания (выбор правильного(-ых) ответа(-ов) из предложенного перечня; задания на соответствие):

ЗАДАНИЕ 1.1. Выберите правильный вариант ответа:

Какие TCAD служат для приборно-технологического проектирования –

а) CADENCE

б) Sentaurus

в) AutoCad

ЗАДАНИЕ 1.2. Выберите правильный вариант ответа:

В САПР TCAD физические модели представлены:

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.

ЗАДАНИЕ 1.3. Выберите правильный вариант ответа:

Выбор размеров элементов сетки в методе конечных элементов определяется:

а) достижением приемлемой сходимости и точности расчета;

б) затратами времени на вычисление;

в) размерами и формой структуры, наличием и величиной градиентов физических параметров;

г) размерами и формой структуры, наличием и величиной градиентов физических параметров;

г) всеми перечисленными факторами в совокупности.

ЗАДАНИЕ 1.4. Выберите правильный вариант ответа:

Теория ЛШШ (Линдхарда-Шарфа-Шиотта) описывает:

- а) процесс окисления;
- б) диффузионное перераспределение примесей при высокотемпературной обработке;
- в) процесс ионной имплантации.**

ЗАДАНИЕ 1.5. Выберите правильный вариант ответа:

Процесс ионной имплантации в аморфном полупроводнике описывается с помощью:

- а) симметричного распределения Гаусса;**
- в) распределения Гаусса с обобщенным экспоненциальным «хвостом»;
- г) распределения Пирсон-IV;
- д) распределения Пирсон-IV с линейно-экспоненциальным «хвостом».

ЗАДАНИЕ 1.6. Выберите правильный вариант ответа:

Скорость протекания процесса при окислении кремния определяется:

- а) временем окисления;
- б) скоростью диффузии окислителя в слое окисла по направлению к границе окисел-кремний;**
- в) размерами диффузионной печи.

ЗАДАНИЕ 1.7. Выберите правильный вариант ответа:

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.**

ЗАДАНИЕ 1.8. Выберите правильный вариант ответа:

Сегрегация примеси - это:

- а) явление перераспределения примеси между окислом и полупроводником, происходящее 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, происходящее при его нагреве в инертной среде;
- г) перераспределение примеси в объеме полупроводника при высокой температуре.

ЗАДАНИЕ 1.9. Выберите правильный вариант ответа:

К какому поколению САПР приборно-технологического проектирования относится САПР Sentaurus:

- а) I поколение;
- б) II поколение;
- в) III поколение.**

ЗАДАНИЕ 1.10. Выберите правильный вариант ответа:

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 эффекта каналирования ионов в монокристаллическом полупроводнике;**
- г) уменьшения нагрева поверхности подложки.

ЗАДАНИЕ 1.11. Выберите правильный вариант ответа:

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.

ЗАДАНИЕ 1.12. Выберите правильный вариант ответа:

Для визуализации двухкоординатных графиков в Sentaurus TCAD используется:

- а) модуль Inspect;
- б) модуль Tecplot;
- в) внешние графические программы;
- г) модули Inspect и Tecplot.**

ЗАДАНИЕ 1.13. Выберите правильный вариант ответа:

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.

ЗАДАНИЕ 1.14. Выберите правильный вариант ответа:

Для расчета электрофизических параметров в Sentaurus TCAD используется:

- а) модуль SProcess;
- б) модуль SNMesh;
- в) модуль SDevice.**

2) задания с коротким ответом (ответ на задание состоит из числа, слова или словосочетания):

ЗАДАНИЕ 2.1. К какому поколению САПР приборно-технологического проектирования относится САПР Sentaurus?

Ответ: III поколение

ЗАДАНИЕ 2.2. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента DonorConcentration в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

Ответ: концентрация донорной примеси

ЗАДАНИЕ 2.3. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента TotalConcentration в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

Ответ: суммарная концентрация примесей

ЗАДАНИЕ 2.4. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента eMobility в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

Ответ: подвижность электронов

ЗАДАНИЕ 2.5. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента hMobility в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

Ответ: подвижность дырок

ЗАДАНИЕ 2.6. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента ElectricField в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

Ответ: напряженность электрического поля

ЗАДАНИЕ 2.7. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента ElectrostaticPotential в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

Ответ: электростатический потенциал

ЗАДАНИЕ 2.8. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой deposit?

Ответ: осаждение

ЗАДАНИЕ 2.9. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой diffuse?

Ответ: диффузия

ЗАДАНИЕ 2.10. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой etching?

Ответ: травление

ЗАДАНИЕ 2.11. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой implant?

Ответ: имплантация

ЗАДАНИЕ 2.12. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой strip Photoresist?

Ответ: удаление фоторезиста

ЗАДАНИЕ 2.13. Какой параметр процесса ионной имплантации задается аргументом dose в команде implant программного модуля SProcess?

Ответ: доза

ЗАДАНИЕ 2.14. Какой параметр процесса ионной имплантации задается аргументом energy в команде implant программного модуля SProcess?

Ответ: энергия

ЗАДАНИЕ 2.15. Какой параметр процесса ионной диффузии задается аргументом temperature в команде diffuse программного модуля SProcess?

Ответ: температура

ЗАДАНИЕ 2.16. Какой параметр процесса ионной диффузии задается аргументом time в команде diffuse программного модуля SProcess?

Ответ: время

3) расчетные, ситуационные, практико-ориентированные задачи / мини-кейсы (ответ содержит решение поставленной задачи):

ЗАДАНИЕ 3.1. Опишите последовательность технологических операций, описанных в командном файле программного модуля SProcess:

deposit Nitride thickness = 700<nm>
etch Nitride etchstop = Oxide rate = 100<nm/min> type = anisotropic

Ответ: Осаждение слоя нитрида кремния толщиной 700 нм

Анизотропное травление нитрида кремния со скоростью 100 нм/мин до границы с окислом.

ЗАДАНИЕ 3.2. Опишите последовательность технологических операций, описанных в командном файле программного модуля SProcess:

region Silicon xlo = 0<mkm> xhi = -6<mkm> ylo = 0<mkm> yhi = 10<mkm>
init field=Boron concentration = 1e+15<cm-3> wafer.orient=100

Ответ: Задание области моделирования кремниевой подложки с координатами по оси X (-6; 0) мкм и по оси Y (0; 10) мкм

Заданная область легирована бором с концентрацией 10^{15} см⁻³ и имеет ориентацию кремния (100)

ЗАДАНИЕ 3.3. Опишите последовательность технологических операций, описанных в командном файле программного модуля SProcess:

implant Phosphorus dose = 1.6e13<cm-2> energy = 50<keV>
diffuse temperature = 1000<gradC> time = 3<min> O2

Ответ: Имплантация фосфора с дозой $1.6 \cdot 10^{13}$ см⁻² и энергией 50 кэВ

Диффузия при температуре 1000 °С в течение 3 минут в атмосфере сухого кислорода

ЗАДАНИЕ 3.4. Опишите последовательность технологических операций, описанных в командном файле программного модуля SProcess:

deposit PolySilicon thickness = 1000<nm>
mask name = gate segments = {0 0.5 } negative
photo mask = gate thickness = 1000<nm>
etch PolySilicon etchstop = oxide type = anisotropic rate = 100
strip Photoresist

Ответ: Осаждение слоя поликремния толщиной 1000 нм

Задание негативной маски с именем gate с координатами сегмента 0 мкм 0.5 мкм

Нанесение маски с именем gate толщиной фоторезиста 1000 нм

Анизотропное травление поликремния со скоростью 100 нм/мин до границы с окислом

Удаление фоторезиста

ЗАДАНИЕ 3.5. Опишите последовательность технологических операций, описанных в командном файле программного модуля SProcess:

deposit PolySilicon thickness = 1000<nm>
mask name = gate segments = {0 0.5 } negative
photo mask = gate thickness = 1000<nm>
etch PolySilicon etchstop = oxide type = anisotropic rate = 100
strip Photoresist

Ответ: Осаждение слоя поликремния толщиной 1000 нм

Задание негативной маски с именем gate с координатами сегмента 0 мкм 0.5 мкм

Нанесение маски с именем gate толщиной фоторезиста 1000 нм

Анизотропное травление поликремния со скоростью 100 нм/мин до границы с окислом

Удаление фоторезиста

ЗАДАНИЕ 3.6. Опишите последовательность технологических операций, описанных в командном файле программного модуля SProcess:

```
contact x = -0.5 y = -0.675 point name = "gate" PolySilicon
contact x = -0.3 y = -2.675 point name = "source" Aluminum
contact x = -0.3 y = +2.675 point name = "drain" Aluminum
```

Ответ:

- Описание поликремниевого контакта с именем **gate** для области, в которой расположена точка с координатами $x = -0.5$ мкм и $y = -0.675$ мкм
- Описание алюминиевого контакта с именем **source** для области, в которой расположена точка с координатами $x = -0.3$ мкм и $y = -2.675$ мкм
- Описание алюминиевого контакта с именем **drain** для области, в которой расположена точка с координатами $x = -0.3$ мкм и $y = +2.675$ мкм

ЗАДАНИЕ 3.7. Каково назначение и значение параметра AreaFactor в блоке Physics командного файла программного модуля SDevice:

```
Physics { AreaFactor = 1e3 EffectiveIntrinsicDensity(Slotboom)
  Mobility(DopingDependence
  HighFieldSaturation(GradQuasiFermi)
  NormalElectricField)
  Recombination(SRH(DopingDependence)
  Band2Band Auger Avalanche)
  Temperature = 300 }
```

Ответ: AreaFactor задает толщину двумерной структуры, преобразуя её в трёхмерную, толщиной 1000 мкм

ЗАДАНИЕ 3.8. Каково назначение параметра EffectiveIntrinsicDensity(Slotboom) в блоке Physics командного файла программного модуля SDevice:

```
Physics { AreaFactor = 1e3 EffectiveIntrinsicDensity(Slotboom)
  Mobility(DopingDependence
  HighFieldSaturation(GradQuasiFermi)
  NormalElectricField)
  Recombination(SRH(DopingDependence)
  Band2Band Auger Avalanche)
  Temperature = 300 }
```

Ответ: Параметр EffectiveIntrinsicDensity(Slotboom) позволяет включить модель сужения ширины запрещенной зоны от концентрации примесей

ЗАДАНИЕ 3.9. Каково назначение аргументов параметра Mobility в блоке Physics командного файла программного модуля SDevice:

```
Physics { AreaFactor = 1e3 EffectiveIntrinsicDensity(Slotboom)
  Mobility(DopingDependence
  HighFieldSaturation(GradQuasiFermi)
  NormalElectricField)
  Recombination(SRH(DopingDependence)
  Band2Band Auger Avalanche)
  Temperature = 300 }
```

Ответ: Параметр Mobility служит для задания моделей, учитывающих изменение подвижности носителей заряда под действием следующих факторов: DopingDependence – зависимость от концентрации примесей; HighFieldSaturation(GradQuasiFermi) – насыщение дрейфовой скорости носи-

телей заряда в сильном электрическом поле; **NormalElectricField** – влияние нормального к поверхности подложки электрического поля

ЗАДАНИЕ 3.10. Каково назначение аргументов параметра Recombination в блоке Physics командного файла программного модуля SDevice:

```
Physics { AreaFactor = 1e3 EffectiveIntrinsicDensity(Slotboom)
  Mobility(DopingDependence
    HighFieldSaturation(GradQuasiFermi)
    NormalElectricField)
  Recombination(SRH(DopingDependence)
    Band2Band Auger Avalanche)
  Temperature = 300 }
```

Ответ: Параметр **Recombination** служит для задания моделей, учитывающих процессы генерации-рекомбинации носителей заряда: **SRH(DopingDependence)** – рекомбинация носителей заряда по модели Шокли-Рида-Холла с учетом зависимости от концентрации примесей; **Band2Band** – генерация носителей заряда путем туннельного перехода зона-зона; **Auger** – Оже-рекомбинация; **Avalanche** – лавинная генерация (или ударная генерация) электронно-дырочных пар

ЗАДАНИЕ 3.11. Какие концентрационные характеристики будут рассчитаны в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice:

```
Plot{ AcceptorConcentration DonorConcentration DopingConcentration
  TotalConcentration eDensity hDensity eMobility hMobility
  BuiltinPotential ElectricField ElectrostaticPotential SpaceCharge
  SRHRecombination TotalRecombination eCurrentDensity
  hCurrentDensity TotalCurrentDensity eDriftVelocity hDriftVelocity
  eGradQuasiFermi/Vector hGradQuasiFermi/Vector
  eQuasiFermiPotential hQuasiFermiPotential AvalancheGeneration}?
```

Ответ: **AcceptorConcentration** – концентрация акцепторных примесей; **DonorConcentration** – концентрация донорных примесей; **DopingConcentration** – разность

TotalConcentration Параметр **Recombination** служит для задания моделей, учитывающих процессы генерации-рекомбинации носителей заряда: **SRH(DopingDependence)** – рекомбинация носителей заряда по модели Шокли-Рида-Холла с учетом зависимости от концентрации примесей; **Band2Band** – генерация носителей заряда путем туннельного перехода зона-зона; **Auger** – Оже-рекомбинация; **Avalanche** – лавинная генерация (или ударная генерация) электронно-дырочных пар

ЗАДАНИЕ 3.12. Составить фрагмент командного файла программного модуля Sprocess для выполнения следующей последовательности технологических операций:

- исходная подложка марки КЭФ0,2 с ориентацией (110);
- окисление в сухом кислороде в течение 45 минут при температуре 1200 °С;
- нормальная имплантация ионов бора с энергией 100 кэВ и дозой 100 мкКл/см².

Ответ:

```
init field=Phosphorus Silicon resistivity=0.2 wafer.orient=110
diffuse temperature = 1200 time = 45 O2
```

ЗАДАНИЕ 3.13. Составить фрагмент командного файла программного модуля Sprocess для выполнения следующей последовательности технологических операций:

- исходная подложка марки КЭФ0,2 с ориентацией (100);
- нанесение окисла толщиной 0.1 мкм;
- имплантация ионов бора с энергией 100 кэВ и дозой $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Ответ:

```
init field=Phosphorus Silicon resistivity=0.2 wafer.orient=100  
deposit oxide thickness = 0.1  
implant Boron dose = 6.25e+14energy = 100
```

ЗАДАНИЕ 3.14. Составить фрагмент командного файла программного модуля Sprocess для выполнения следующей последовательности технологических операций:

- нанесение слоя поликремния толщиной 1 мкм;
- нанесение ранее созданной маски с именем gate с толщиной фоторезиста 1 мкм;
- анизотропное травление поликремния со скоростью 100 нм/мин до границы с окислом;
- удаление фоторезиста.

Ответ:

```
deposit PolySilicon thickness = 1  
photo mask = gate thickness = 1  
etch PolySilicon etchstop = oxide type = anisotropic rate = 100  
strip Photoresist
```

ЗАДАНИЕ 3.15. Составить фрагмент командного файла программного модуля Sprocess для выполнения следующей последовательности технологических операций:

- имплантация ионов фосфора с энергией 50 кэВ и дозой $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.
- диффузия в сухом кислороде в течение 3 минут при температуре 1000 °С;

Ответ:

```
implant Phosphorus dose = 6.25·1e14 energy = 50  
diffuse temperature = 1000 time = 3 O2
```

Критерии и шкалы оценивания:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) тестовые задания:

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ, в том числе частично.

2) задания с коротким ответом:

- 2 балла – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ, в том числе частично.

3) расчетные задачи, ситуационные, практико-ориентированные задачи / мини-кейсы:

- 5 баллов – задача решена верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход решения);
- 2 балла – решение задачи содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода ее решения, или задача решена не полностью, но получены промежуточные результаты, отражающие правильность хода решения

задачи, или, в случае если задание состоит из решения нескольких подзадач, 50% которых решены верно;

- 0 баллов – задача не решена или решение неверно (ход решения ошибочен или содержит грубые ошибки, значительно влияющие на дальнейшее изучение задачи).