

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



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
 физики полупроводников и микроэлектроники  
 факультет  
 (Е.Н.Бормонтов)

31.08.2024

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.06 Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств

1. Код и наименование направления подготовки/специальности: **03.04.03**

Радиофизика

2. Профиль подготовки: Интегральная элементная база телекоммуникационных технологий

3. Квалификация (степень) выпускника: магистр

4. Форма образования: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: \_\_\_\_\_

физики полупроводников и микроэлектроники

6. Составители программы: Быкадорова Галина Владимировна, \_\_\_\_\_

кандидат технических наук, доцент

7. Рекомендована: НМС физического факультета протокол №6 от 26.06.2024

8. Учебный год: 2024-2025, 2025-2026 Семестр: 2,3

9. Цели и задачи учебной дисциплины: Целями освоения дисциплины «Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств» является формирование специальных знаний в области физико-технологического проектирования как неотъемлемой и обязательной части всего маршрута проектирования проборов и устройств микро- и наноэлектроники.

В задачи дисциплины входят:

- рассмотрение общих вопросов приборно-технологического проектирования;
- конструктивно-технологические особенности проектирования;

- исследование проблем однородности и воспроизводимости электрических параметров изделий микро- и наноэлектроники;
- общие характеристики правил проектирования, их заполнение;
- приборно-технологическое моделирование в общем маршруте проектирования элементов биполярных и полевых интегральных схем;
- обзор и изучение существующих специализированных программных продуктов для проектирования проборов и устройств микро- и наноэлектроники.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- фундаментальные разделы физики полупроводников и твердотельной электроники, необходимые для решения научно-исследовательских задач проектирования элементов ИС;

- технологию работы на ПК в современных операционных средах, основные методы разработки алгоритмов и программ, структуры данных, используемые для представления типовых информационных объектов, типовые алгоритмы обработки данных;

- новые методики инженерно-технологической деятельности;

- методы расчета, проектирования, конструирования и модернизации электронной компонентной базы с использованием систем автоматизированного проектирования и компьютерных средств;

уметь:

- 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, расширять и углублять своё научное мировоззрение;

- оперировать углубленными знаниями в области математики и естественных наук;

- выдвигать новые идеи и адаптироваться к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности, к изменению социокультурных и социальных условий деятельности;

- составлять обзоры перспективных направлений научно-инновационных исследований, готовностью к написанию и оформлению патентов в соответствии с правилами;

- применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования приборов элементов ИС;

- использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций, способствующие повышению эффективности проектных работ при создании проборов и устройств микро- и наноэлектроники;

- разрабатывать физические и математические модели приборов и устройств микро- и наноэлектроники; разрабатывать технологические маршруты их изготовления;

владеть:

- навыками критического восприятия информации;

- 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;

- современными программными средствами (CAD) моделирования, оптимального проектирования и конструирования приборов, схем и устройств микро- и наноэлектроники различного функционального назначения;

- методами проектирования электронной компонентной базы и технологических процессов микроэлектроники;

- методами математического моделирования приборов и технологических процессов с целью оптимизации их параметров.

**10. Место учебной дисциплины в структуре ОПОП:** дисциплина относится к обязательной части блок Б1 «Дисциплины (модули)».

Для ее усвоения требуются знания, формируемые при освоении ОПОП бакалавриата в рамках курсов математики, физики, компьютерного моделирования.

В результате прохождения данной дисциплины обучающийся должен приобрести знания, умения, навыки общепрофессиональных компетенций, необходимых для обеспечения трудовых функций G/03.7 «Математическое и компьютерное моделирование составных частей радиоэлектронных средств» профессионального стандарта 06.048 «Инженер-радиоэлектронщик в области радиотехники и телекоммуникаций» и В/01.7 «Конструирование наногетероструктурных СВЧ-монокристаллических интегральных схем в соответствии с техническим заданием для выбираемой технологии» профессионального стандарта 40.003 «Инженер-конструктор в области производства наногетероструктурных СВЧ-монокристаллических интегральных схем».

Знания, полученные при освоении дисциплины «Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств», необходимы при выполнении научно-исследовательских работ и магистерской выпускной квалификационной работы в области микро- и нанoeлектроники.

**11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:**

Компетенции		Индикаторы		Планируемые результаты обучения
Код	Наименование компетенции	Код(ы)	Наименование индикатора(ов)	
ПК-2	Способен принимать участие в разработке и научных исследованиях интегральной элементной базы телекоммуникационных систем	ПК-2.1	Способен моделировать низкоразмерные структуры и проектировать приборы на их основе	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- специальные программные средства проектирования технологии и топологии приборов, схем и устройств микро- и нанoeлектроники различного функционального назначения;</li> </ul> <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- разрабатывать средства моделирования в специализированных пакетах приборно-технологического проектирования;</li> </ul> <p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- современными программными средствами (CAD) моделирования, оптимального проектирования и конструирования приборов, схем и устройств микро- и нанoeлектроники различного функционального назначения</li> </ul>
		ПК-2.2	Способен принимать участие в работах по технологической подготовке производства интегральной элементной базы и радиоэлектронных систем	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методы расчета, проектирования, конструирования и модернизации электронной компонентной базы с использованием систем автоматизированного проектирования;</li> </ul> <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- моделировать средствами САПР устройства, приборы и системы электронной техники с учетом заданных требований;</li> </ul> <p><i>Владеть:</i></p>

				- средствами САПР при проектировании устройств и приборов электронной техники с учетом заданных требований;
		ПК-2.4	Учитывает условия эксплуатации при проектировании элементной базы радиоэлектроники	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- фундаментальные разделы физики полупроводников и твердотельной электроники, необходимые для решения научно-исследовательских задач проектирования элементов ИС;</li> </ul> <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- осуществлять выбор наиболее оптимальных прикладных программных пакетов для решения соответствующих задач научной и образовательной деятельности;</li> <li>- применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования приборов элементов ИС;</li> <li>- разрабатывать физические и математические модели приборов и устройств микро- и нанoeлектроники; разрабатывать технологические маршруты их изготовления;</li> </ul> <p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методами проектирования электронной компонентной базы и технологических процессов микроэлектроники;</li> <li>- методами математического моделирования приборов и технологических процессов с целью оптимизации их параметров</li> </ul>

## 12. Объем дисциплины в зачетных единицах/часах — 6 / 216.

Форма промежуточной аттестации – зачет, экзамен, курсовая работа

## 13. Виды учебной работы:

Вид учебной работы		Трудоемкость (часы)		
		Всего	По семестрам	
			2 сем.	3 сем.
Аудиторные занятия,		74	36	38
в том числе:	лекции	24	12	12
	лабораторные	50	24	26
Самостоятельная работа, в том числе курсовая работа		106	72	34
Форма промежуточной аттестации: экзамен		36		36
Итого:		108	108	108

### 13.1. Содержание дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-

			курса, ЭУМК *
<b>Лекции</b>			
1.1	Введение в САПР приборно-технологического проектирования	<p>Физическое и математическое моделирование процессов в микроэлектронике как инструмент оптимизации параметров ИС и фундамент современных компьютерных систем приборно-технологического проектирования в микроэлектронике.</p> <p>Общая характеристика процесса проектирования. Маршруты и этапы проектирования. Восходящее и нисходящее проектирование. Основы функционально-логического, схемотехнического, физико-топологического и приборно-технологического проектирования. Виды и способы проектирования.</p> <p>Методы описания элементной базы микроэлектроники и твердотельной электроники на различных этапах проектирования.</p> <p>Поколения САПР TCAD</p>	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390</a>
1.2	Основы приборно-технологического проектирования в специализированных пакетах САПР TCAD	Введение в среду приборно-технологического моделирования САПР TCAD. Системные средства: интерфейс пользователя, построение и редактирование создаваемых проектов, организация вычислительного процесса, работа с программными пакетами по планированию экспериментов, оптимизации и статистическому анализу. Визуализация результатов экспериментов	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-1">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-1</a>
1.3	Приборно-технологическое проектирование элементной базы микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	Одно-, двух- и трехмерное моделирование технологических процессов для кремния, германия и сложных полупроводников. Моделирование стандартных технологических процессов: диффузия, имплантация, моделирование имплантации методом Монте-Карло, окисление, травление, осаждение, силицидизация	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-2">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-2</a>
1.4	Создание и моделирование приборов микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	Создание и редактирование двух- и трехмерных приборных структур и эмуляция трехмерных технологических процессов. Многомерное моделирование электрофизических параметров изолированных полупроводниковых приборов и приборов, соединенных в схему	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-3">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-3</a>
1.5	Моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах	Двух- и трехмерное моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-4">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-4</a>
1.6	Проектирование конструкции, технологии и электрофизических характеристик элементов интегральных схем	Современные методы приборно-технологического проектирования полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390</a>
<b>Лабораторные занятия</b>			
2.1	Введение в САПР приборно-технологического проектирования		
2.2	Основы приборно-	Лабораторная работа 1. Изучение состава специа-	<a href="https://edu.v">https://edu.v</a>

	технологического проектирования в специализированных пакетах САПР TCAD	лизированного пакета приборно-технологического проектирования САПР TCAD. Освоение интерфейса пользователя. Изучение программных средств визуализации результатов экспериментов Лабораторная работа 3. Изучение программных средств визуализации результатов экспериментов	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-5">su.ru/course/view.php?id=4390#section-5</a> <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-7">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-7</a>
2.3	Приборно-технологическое проектирование элементной базы микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	Лабораторная работа 2. Изучение программы технологического моделирования специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD. Изучение программы моделирования электрофизических параметров специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-6">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-6</a>
2.4	Создание и моделирование приборов микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD		
2.5	Моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах		
2.6	Проектирование конструкции, технологии и электрофизических характеристик элементов интегральных схем	Лабораторная работа 4. Проектирование технологии эпитаксиально-планарного диода Лабораторная работа 5. Проектирование технологии эпитаксиально-планарного $n-p-n$ -транзистора с изоляцией $p-n$ -переходом Лабораторная работа 6. Проектирование технологии и исследование электрофизических параметров $n$ -МОП-структур. Лабораторная работа 7. Проектирование технологии и исследование электрофизических параметров СВЧ LDMOS-структур.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-8">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-8</a> <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-9">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-9</a> <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-10">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-10</a> <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-11">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4390#section-11</a>

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Виды занятий (часов)			
		Лекции	Лабораторные	Самостоятельная	Всего

				работа	
1	Введение в САПР приборно-технологического проектирования	2	-	6	8
2	Основы приборно-технологического проектирования в специализированных пакетах САПР TCAD	2	8	14	24
3	Приборно-технологическое проектирование элементной базы микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	4	10	20	34
4	Создание и моделирование приборов микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	6	16	20	42
5	Моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах	4	-	20	24
6	Проектирование элементов и технологических процессов изготовления элементов интегральных схем	6	16	26	48
	Итого:	24	50	106	180
	Экзамен				36
	Итого по курсу				216

#### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

Изучение дисциплины «Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств» предусматривает осуществление учебной деятельности состоящей из двух частей: обучения студентов преподавателем и самостоятельной учебной деятельности студентов по изучению дисциплины.

Дисциплина «Приборно-технологическое проектирование электронной компонентной базы» может реализовываться с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов-магистров. Студентам, чтобы хорошо овладеть учебным материалом, необходимо выработать навыки правильной и планомерной работы. Перед началом лекционных занятий надо просмотреть все, что было сделано в предыдущий раз. Это позволит сосредоточить внимание и восстановить в памяти уже имеющиеся знания по данному предмету. Кроме того, такой метод поможет лучше запомнить как старое, так и новое, углубит понимание того и другого, так как при этом устанавливаются связи нового со старым, что является не только обязательным, но и основным условием глубокого овладения материалом. Чем детальнее изучаемое ассоциируется с известным ранее, тем прочнее сохраняется в памяти и быстрее вспомнить, когда требуется.

Приступая к изучению нового материала, необходимо сосредоточиться, т.е. сконцентрировать внимание и не отвлекаться от выполняемой работы, помня, что желание запомнить является гарантией успешной работы, отсутствие же воли к запоминанию снижает эффект восприятия.

Следует помнить о том, что через лекцию передается не только систематизированный теоретический материал, но и постигается методика научного исследования и умение самостоятельно работать, анализировать различного рода явления.

Записывать на лекции необходимо главное, не стремясь зафиксировать все слово в слово. Выбрать же главное без понимания предмета невозможно. Наличие собственного конспекта лекций позволяет еще раз ознакомиться, продумать, разобраться в новом материале, так как недостаточно хорошо понятые во время лекции положе-

ния могут быть восстановлены в памяти, сопоставлены с другими, додуманы, дополнены, уяснены и расширены с помощью учебной литературы. Записи являются пособиями для повторения, дают возможность охватить содержание лекции и всего курса в целом.

При этом хорошо овладеть содержанием лекции – это:

- знать тему;
  - понимать значение и важность ее в данном курсе;
  - четко представлять план;
  - уметь выделить основное, главное;
  - усвоить значение примеров и иллюстраций;
  - связать вновь полученные сведения о предмете или явлении с уже имеющимися;
  - представлять возможность и необходимость применения полученных сведений.
- Существует несколько общих правил работы на лекции:
- лекции по каждому предмету записывать удобнее в отдельных тетрадях, оставляя широкие поля для пометок;
  - к прослушиванию лекций следует готовиться, что позволит в процессе лекции отделить главное от второстепенного;
  - лекции необходимо записывать с самого начала, так как оно часто бывает ключом ко всей теме;
  - так как дословно записать лекцию невозможно, то необходимо в конспекте отражать: формулы, определения, схемы, трудные места, мысли, примеры, факты и положения от которых зависит понимание главного, новое и незнакомое, неопубликованные данные, материал отсутствующий в учебниках и т.п.;
  - записывать надо сжато;
  - во время лекции важно непрерывно сохранять рабочую установку, умственную активность.

Изучение теоретического материала в данном курсе не ограничивается подготовкой к лекциям и работой на данном виде занятий. Лекционная часть курса органически взаимосвязана с иными видами работ: написанием рефератов, участием в семинарских и лабораторных занятиях, подготовкой и сдачей зачета по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента.

Самостоятельная работа обучающихся наряду с аудиторной представляет одну из форм учебного процесса и является существенной ее частью, что наиболее ярко представлено в процессе подготовки бакалавров. Последнее обусловлено тем, что самостоятельная работа предназначена для формирования навыков самостоятельной работы как вообще, так и в учебной, научной деятельности, формирование и развитие способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решать проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т.д.

Самостоятельная работа формирует самостоятельность не только как совокупность умений и навыков, но и как черту характера, играющую существенную роль в структуре личности современного специалиста высшей квалификации. Она воспитывает самостоятельность как черту характера. Никакие знания, полученные на уровне пассивного восприятия, не ставшие объектом собственной умственной или практической работы, не могут считаться подлинным достоянием человека.

Давая возможность расширять и обогащать знания, умения по индивидуальным направлениям, самостоятельная работа обучающегося позволяет создать разносторонних специалистов. В процессе самостоятельной работы развивают творческие возможности обучающегося, при этом самостоятельная работа завершает задачи всех видов учебной работы.

Самостоятельная работа - это планируемая работа обучающихся, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосред-

ственного участия. Преподаватель, ведущий занятия, организует, направляет самостоятельную работу обучающихся и оказывает им необходимую помощь. Однако самостоятельность обучающихся должна превышать объем работы, контролируемой преподавателем работы, и иметь в своей основе индивидуальную мотивацию обучающегося по получению знаний, необходимых и достаточных для будущей профессиональной деятельности в избранной сфере. Преподаватель при необходимости может оказывать содействие в выработке и коррекции данной мотивации, лежащей в основе построения самостоятельной деятельности обучающегося по изучению дисциплины, получению необходимых знаний и навыков.

Получение образования предполагает обучение решению задач определенной сферы деятельности. Однако как бы хорошо не обучались обучающиеся способам решения задач в аудитории, сформировать средства практической деятельности не удастся, так как каждый случай практики особый и для его решения следует выработать особый профессиональный стиль мышления.

Основой самостоятельной работы служит научно-теоретический курс, комплекс полученных обучающимся знаний. Основной, наиболее экономичной формой получения и усвоения информации, теоретических знаний в вузе является лекция, позволяющая воспринять значительную сумму основных знаний и потому способствующая повышению продуктивности всех других форм учебного труда.

Результат обучения и самостоятельной работы обучающегося предполагает наличие следующих составляющих:

- понимание методологических основ построения изучаемых знаний;
- выделение главных структур учебного курса;
- формирование средств выражения в данной области;
- построение методик решения задач и ориентации в проблемах (ситуациях).

Самостоятельная работа обучающихся при изучении «Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств» включает в себя: подготовку и участие в изучении теоретической части курса, выполнение лабораторных работ, подготовку к экзамену.

Самостоятельная работа студента при изучении дисциплины «Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств» включает в себя:

изучение теоретической части курса	- 38 часов
подготовку к лабораторным занятиям	- 12 часов
написание отчетов по лабораторным работам	- 12 часов
написание курсовой работы	- 44 часа
	итого - 106 часов

Подготовка к экзамену – 36 часов

## 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов Интернет, необходимых для освоения дисциплины:

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Малюх, В. Н. Введение в современные САПР: Курс лекций [Электронный ресурс] / Малюх В. Н. — Москва : ДМК Пресс, 2010 .— 192 с. — Книга из коллекции ДМК Пресс - Информатика .— ISBN 978-5-94074-551-8 .— <URL: <a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=1314">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=1314</a> >.
2	Горлач, Б. А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация [Электронный ресурс] / Горлач Б. А., Шахов В. Г. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2018 .— 292 с. — Рекомендовано к изданию редакционно-

	издательским советом Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по программам высшего образования в областях: «Инженерное дело, технологии и технические науки» и «Науки об обществе» .— Книга из коллекции Лань - Математика .— ISBN 978-5-8114-2168-8 .— <URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/103190">https://e.lanbook.com/book/103190</a> >.
3	Прошкин, С. С. Математика для решения физических задач [Электронный ресурс] / Прошкин С. С. — 1-е изд. — Санкт-Петербург : Лань, 2014 .— 384 с. — Допущено НМС по физике Министерства образования и науки РФ в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по техническим и технологическим направлениям: «Электроэнергетика и электротехника» и др.— Книга из коллекции Лань - Физика .— ISBN 978-5-8114-1670-7 .— <URL: <a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=53689">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=53689</a> >.

## б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
4	Приборно-технологическое проектирование элементов МДП-ИС [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для студ. физ. фак. очной формы обучения по программам бакалавриата и магистратуры, для направлений : 03.03.03, 03.04.03 - Радиофизика ; 11.03.04, 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника]. Ч. 1 / Воронеж. гос. ун-т ; [сост.: А.Е. Бормонтов и др.] .— Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2018 .— Загл. с титула экрана .— Свободный доступ из интрасети ВГУ .— Текстовый файл .— <URL: <a href="http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m18-161.pdf">http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m18-161.pdf</a> >.
5	Приборно-технологическое проектирование элементов биполярных ИС [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для студ. физ. фак. очной формы обучения по программам бакалавриата и магистратуры, для направлений : 03.03.03, 03.04.03 - Радиофизика ; 11.03.04, 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост.: Р.П. Алексеев и др.] .— Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2018 .— Загл. с титула экрана .— Свободный доступ из интрасети ВГУ .— Текстовый файл .— <URL: <a href="http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m18-114.pdf">http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m18-114.pdf</a> >.
6	Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и нанoeлектроники [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для слушателей Президентской программы повышения квалификации инженер. кадров "Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и нанoeлектроники" по направлению "Электронная техника, радиотехника и связь", а также для студ. 1 и 2 к. очной формы обучения физ. фак., обуч. по программе магистратуры; для направления 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника с профилями, Интегральная электроника и нанoeлектроника, Нанoeлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост. : Г.В. Быкадорова и др.] .— Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016 .— Загл. с титул. экрана .— Свободный доступ из интрасети ВГУ .— Текстовый файл .— Windows 2000; Adobe Acrobat Reader .— <URL: <a href="http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-42.pdf">http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-42.pdf</a> >. Моделирование полевых полупроводниковых приборов в САПР ISE TCAD : учебное пособие для вузов / Воронеж. гос. ун-т; сост.: В.В. Асессоров, Г.В. Быкадорова, А.Ю. Ткачев — Воронеж : ЛОП ВГУ, 2007 .— 27 с.
7	Приборно-технологическое проектирование элементной базы мощной СВЧ-электроники [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для студ. 1 и 2 к. очной формы , обуч. физ. фак. Воронеж. гос. ун-та, по программам магистратуры; для направлений : 03.04.03 - Радиофизика , 11.03.04 -Электроника и нанoeлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост.: Р.П. Алексеев и др.] .— Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016 .— Загл. с титул. экрана .— Свободный доступ из интрасети ВГУ .— Текстовый файл .— Windows 2000; Adobe Acrobat Reader .— <URL: <a href="http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-41.pdf">http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-41.pdf</a> >.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы:

№ п/п	Источник
8	www.lib.vsu.ru – ЗНБ ВГУ
9	ЭБС Лань
10	ЭБС «Университетская библиотека online»
11	ЭБС «Электронная библиотека технического ВУЗа» (ЭБС «Консультант студента»)*
12	https://edu.vsu.ru – Образовательный портал "Электронный университет ВГУ"

## 16. Учебно-методическое обеспечение для организации самостоятельной работы:

№ п/п	Источник
1	Быкадорова, Галина Владимировна. Системы приборно-технологического проектирования [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г.В. Быкадорова, Е.Н. Бормонтов, А.Н. Цоцорин ; Воронеж. гос. ун-т .— Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2019 .— Загл. с титула экрана .— Свободный доступ из интрасети ВГУ .— Текстовый файл .— ISBN 978-5-9273-2930-4 .— <URL:http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m19-234.pdf>.
2	Приборно-технологическое проектирование элементной базы мощной СВЧ-электроники : учебно-методическое пособие : [для студ. 1 и 2 к. очной формы обуч. физ. фак. Воронеж. гос. ун-та, по программам магистратуры; для направлений : 03.04.03 - Радиофизика , 11.03.04 -Электроника и наноэлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост.: Р.П. Алексеев и др.] .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016 .— 69 с. : ил. — Библиогр.: с.68-69. Издание на др. носителе: Приборно-технологическое проектирование элементной базы мощной СВЧ-электроники [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для студ. 1 и 2 к. очной формы , обуч. физ. фак. Воронеж. гос. ун-та, по программам магистратуры; для направлений : 03.04.03 - Радиофизика , 11.03.04 -Электроника и наноэлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост.: Р.П. Алексеев и др.] .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016.
3	Приборно-технологическое проектирование полевых полупроводниковых приборов : учебно-методическое пособие : [для студ. 1-го и 2-го к. очной формы обучения физ. фак., обуч. по программам магистратуры; для направлений: 03.04.03 - Радиофизика, 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника ] / Воронеж. гос. ун-т ; сост.: А.В. Быстрицкий [и др.] .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2017 .— 36 с. : ил. — Библиогр.: с. 36. Издание на др. носителе: Приборно-технологическое проектирование полевых полупроводниковых приборов [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [ для студ. 1-го и 2-го к. очной формы обучения физ. фак., обуч. по программам магистратуры; для направлений: 03.04.03 - Радиофизика, 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника ] / Воронеж. гос. ун-т ; сост.: А.В. Быстрицкий [и др.] .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2017.
4	Основы работы в среде приборно-технологической САПР SENTAURUS : учебно-методическое пособие : [для студ. физ. фак. очной формы обучения по программам бакалавриата и магистратуры, для направлений: 03.03.03, 03.04.03 - Радиофизика; 11.03.04, 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост.: Р.П. Алексеев и др.] .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2017 .— 96 с. : ил .— Библиогр.: с. 95-96. Издание на др. носителе: Основы работы в среде приборно-технологической САПР SENTAURUS [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для студ. физ. фак. очной формы обучения по программам бакалавриата и магистратуры направле-

	ний : 03.03.03, 03.04.03 - Радиоп физика , 11.03.04 , 11.04.04 -Электроника и наноэлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост.: Р.П. Алексеев и др.] .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2017.
5	Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и наноэлектроники : учебно-методическое пособие / сост. : Г.В. Быкадорова, А.Ю. Ткачёв, Е.Н. Борمونтов, Л.А. Битюцкая .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016 .— 119 с.

### 17. Информационные технологии, используемые для реализации учебного процесса по дисциплине:

№ п/п	Источник
1	<a href="http://www.lib.vsu.ru">http://www.lib.vsu.ru</a> – ЗНБ ВГУ
2	<a href="https://edu.vsu.ru">https://edu.vsu.ru</a> – Образовательный портал "Электронный университет ВГУ"
3	Федеральный портал «Российское образование» <a href="http://www.edu.ru">http://www.edu.ru</a>

### 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Лекционные занятия проводятся в мультимедийном кабинете кафедры ФППИМЭ, оснащённым стационарным мультимедийным проектором AcerX125H – 1 шт., ноутбук emachines e510 – 1 шт., экран, с лицензионным программным обеспечением Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019; ПО Kaspersky Endpoint Security, договор 3010-07/04-20 от 27.01.2020.

Для проведения лабораторных работ необходим компьютерный класс с лицензионным программным обеспечением - лаборатория вычислительных систем и математического моделирования, оснащённая сервером на базе 2-х процессоров Xeon E5-2620 v3. – 1 шт., компьютеры HP ProDesk 400 G6 SFF – 9 шт., компьютеры Pentium Dual Core - 2 шт. , подключенные к сети Интернет с обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ВГУ и с лицензионным программным обеспечением: Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019; программный комплекс для ЭВМ – MathWorks Total Academic Headcoun, Университетская лицензия, договор 3010-07/01-19 от 09.01.19; ПО Kaspersky Endpoint Security, договор 3010-07/04-20 от 27.01.2020.

Аудитория для самостоятельной работы студентов оснащена сервером на базе 2-х процессоров Xeon E5-2620 v3. – 1 шт., компьютеры HP ProDesk 400 G6 SFF – 9 шт., компьютеры Pentium Dual Core - 2 шт. , подключенные к сети Интернет с обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ВГУ и лицензионным программным обеспечением: Microsoft Windows 7, Windows 10, договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019; ПО Kaspersky Endpoint Security, договор 3010-07/04-20 от 27.01.2020.

Реализация дисциплины с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий осуществляется через образовательный портал "Электронный университет ВГУ".

### 19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Компетенция	Индикаторы достижения компетенции	Оценочные средства
-------	---------------------------------	-------------	-----------------------------------	--------------------

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Компетенция	Индикаторы достижения компетенции	Оценочные средства
1	Введение в САПР приборно-технологического проектирования	ПК-2	ПК-2.2	Тесты 1,2,3
2	Основы приборно-технологического проектирования в специализированных пакетах САПР TCAD	ПК-2	ПК-2.2	Тесты 12, 16 - 20 Отчет по лабораторной работе 1
3	Приборно-технологическое проектирование элементной базы микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	ПК-2	ПК-2.2	Тесты 4 – 10, 15 Отчет по лабораторной работе 2
4	Создание и моделирование приборов микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	ПК-2	ПК-2.2	Тесты 11, 14 Отчеты по лабораторным работам 3-7
5	Моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах	ПК-2	ПК-2.1 ПК-2.4	Тесты 13, 14 Отчеты по лабораторным работам 3-7
6	Проектирование конструкции, технологии и электрофизических характеристик элементов интегральных схем	ПК-2	ПК-2.2	Отчеты по лабораторным работам 3-7
Промежуточная аттестация: форма контроля – экзамен				Комплект КИМ Курсовая работа

## 20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

### 20.1 Текущий контроль успеваемости

Текущий контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств: тестовые задания, отчеты о выполнении лабораторных работ.

#### Тестовые задания

Тест 1. Снижение стоимости проектирования изделий микроэлектроники при использовании TCAD происходит:

- 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.

Тест 2. 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.

Тест 3. 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, наличием других неоднородностей структуры (например, интерфейсов);
- г) всеми перечисленными факторами в совокупности.

Тест 4. Процесс ионной имплантации в аморфном полупроводнике описывается с помощью:

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

Тест 5. Скорость протекания процесса при окислении кремния 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.

Тест 6. 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.

Тест 7. 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.

Тест 9. 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.

Тест 10. 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, происходящие при его нагреве в инертной среде;
- г) перераспределение примеси в объеме полупроводника при высокой температуре.

Тест 11. 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.

Тест 12. Командному файлу программного модуля DIOS присваивается расширение:

- а) cmd;
- б) grd;
- в) dat;
- г) lvt.

Тест 13. 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.

Тест 14. 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.

Тест 15. 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.

Тест 16. 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.

Тест 17. Для визуализации двухкоординатных графиков в Sentaurus TCAD используется:

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

Тест 18. 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.

Тест 19. 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.

Тест 20. 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.

Тест 21. Численные значения параметров, которые используются в эксперименте, присваиваются:

- а) в момент заполнения таблицы эксперимента в Sentaurus Workbench;
- б) при выполнении расчета;
- в) при выполнении препроцессорной подготовки.

Тест 22. Серый цвет узла эксперимента обозначает:

- а) «расчет выполнен»;
- б) «расчет не проводился»;
- в) «ошибка в расчете».

### **Перечень тем лабораторных работ**

Лабораторная работа 1. Изучение состава специализированного пакета приборно-технологического проектирования САПР TCAD. Освоение интерфейса пользователя.

Лабораторная работа 2. Изучение программы технологического моделирования специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD. Изучение программы моделирования электрофизических параметров специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD

Лабораторная работа 3. Изучение программных средств визуализации результатов экспериментов

Лабораторная работа 4. Проектирование технологии эпитаксиально-планарного диода

Лабораторная работа 5. Проектирование технологии эпитаксиально-планарного  $n-p-n$ -транзистора с изоляцией  $p-n$ -переходом

Лабораторная работа 6. Проектирование технологии и исследование электрофизических параметров  $n$ -МОП-структур.

## Лабораторная работа 7. Проектирование технологии и исследование электрофизических параметров СВЧ LDMOS-структур.

Для текущего контроля успеваемости используется устный опрос, тестирование, отчеты о ходе выполнения лабораторных работ, на основе которых выставляется предварительная оценка *отлично/хорошо/удовлетворительно/ неудовлетворительно*.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала предварительных оценок
Обучающийся в полной мере владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания для выполнения тестов, решения практических задач при выполнении лабораторных работ	Повышенный уровень	<i>Отлично</i>
Обучающийся владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), допускает незначительные ошибки при выполнении тестов и лабораторных задач	Базовый уровень	<i>Хорошо</i>
Обучающийся владеет частично теоретическими основами дисциплины, фрагментарно способен проходить тестирование и выполнять лабораторные задания	Пороговый уровень	<i>Удовлетворительно</i>
Неудовлетворительное выполнение тестовых заданий. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки при выполнении практических задач лабораторных работ	–	<i>Неудовлетворительно</i>

### Примерный перечень тем курсовых работ

1. Сквозное проектирование технологии латерального МОП-транзистора в среде приборно-технологической САПР TCAD.
2. Сквозное проектирование электрофизических параметров латерального МОП-транзистора в среде приборно-технологической САПР TCAD.
3. Сквозное проектирование технологии нано-КНИ-транзистора в среде САПР TCAD.
4. Сквозное проектирование электрофизических параметров нано-КНИ-транзистора в среде САПР TCAD.
5. Сквозное моделирование технологии создания биполярных транзисторных структур в среде приборно-технологической САПР TCAD.
6. Сквозное проектирование технологии субмикронного МОП-транзистора в среде приборно-технологической САПР TCAD.
7. Сквозное проектирование электрофизических параметров субмикронного МОП-транзистора в среде приборно-технологической САПР TCAD.
8. Сквозное проектирование эпитаксиально-планарного  $n-p-n$ -транзистора с эмиттерной стенкой и щелевой изоляцией в среде приборно-технологической САПР TCAD.
9. Сквозное проектирование LDMOS-структуры в среде приборно-технологической САПР TCAD.
10. Сквозное проектирование самосовмещенной технологии планарного  $n-p-n$ -транзистора в среде приборно-технологической САПР TCAD.

11. Сквозное проектирование UDMOS-структуры в среде приборно-технологической САПР TCAD.
12. Сквозное проектирование технологии и исследование FinFet-структуры в среде приборно-технологической САПР TCAD.

## 20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

### Перечень вопросов к экзамену

1. Физическое и математическое моделирование процессов в микроэлектронике как инструмент оптимизации параметров ИС
2. Современные компьютерные системы приборно-технологического проектирования в микроэлектронике
3. Общая характеристика процесса проектирования: маршруты и этапы проектирования.
4. Общая характеристика процесса проектирования: восходящее и нисходящее проектирование.
5. Функционально-логическое, схемотехническое, физико-топологическое и приборно-технологическое проектирование
6. Методы описания элементной базы микроэлектроники и твердотельной электроники на различных этапах проектирования
7. Сравнение различных технологий и методологий проектирования
8. Поколения САПР TCAD
9. Среда приборно-технологического моделирования САПР TCAD
10. Системные средства САПР TCAD: интерфейс пользователя
11. Системные средства САПР TCAD: построение и редактирование создаваемых проектов
12. Системные средства САПР TCAD: организация вычислительного процесса
13. Системные средства САПР TCAD: работа с программными пакетами по планированию экспериментов, оптимизации и статистическому анализу
14. Визуализация результатов экспериментов
15. Одномерное моделирование технологических процессов для кремния, германия и сложных полупроводников
16. Двух- и трехмерное моделирование технологических процессов для кремния, германия и сложных полупроводников
17. Моделирование стандартных технологических процессов: диффузия, окисление
18. Моделирование стандартных технологических процессов: имплантация
19. Моделирование стандартных технологических процессов: травление, осаждение
20. Создание и редактирование двух- и трехмерных приборных структур и эмуляция трехмерных технологических процессов.
21. Многомерное моделирование электрофизических характеристик полупроводниковых приборов
22. Двух- и трехмерное моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах
23. Современные методы приборно-технологического проектирования полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем

### **Контрольно-измерительный материал № 1**

1. Физическое и математическое моделирование процессов в микроэлектронике как инструмент оптимизации параметров ИС
2. Системные средства САПР TCAD: построение и редактирование создаваемых проектов

### **Контрольно-измерительный материал № 2**

1. Современные компьютерные системы приборно-технологического проектирования в микроэлектронике
2. Системные средства САПР TCAD: организация вычислительного процесса

### **Контрольно-измерительный материал № 3**

1. Общая характеристика процесса проектирования: маршруты и этапы проектирования
2. Системные средства САПР TCAD: работа с программными пакетами по планированию экспериментов, оптимизации и статистическому анализу

### **Контрольно-измерительный материал № 4**

1. Общая характеристика процесса проектирования: восходящее и нисходящее проектирование.
2. Визуализация результатов экспериментов

### **Контрольно-измерительный материал № 5**

1. Функционально-логическое, схемотехническое, физико-топологическое и приборно-технологическое проектирование
2. Одномерное моделирование технологических процессов для кремния, германия и сложных полупроводников

### **Контрольно-измерительный материал № 6**

1. Методы описания элементной базы микроэлектроники и твердотельной электроники на различных этапах проектирования
2. Двух- и трехмерное моделирование технологических процессов для кремния, германия и сложных полупроводников

### **Контрольно-измерительный материал № 7**

1. Сравнение различных технологий и методологий проектирования
2. Моделирование стандартных технологических процессов: диффузия, окисление

### **Контрольно-измерительный материал № 8**

1. Поколения САПР TCAD

## 2. Моделирование стандартных технологических процессов: имплантация

### **Контрольно-измерительный материал № 9**

1. Среда приборно-технологического моделирования САПР TCAD
2. Моделирование стандартных технологических процессов: травление, осаждение

### **Контрольно-измерительный материал № 10**

1. Системные средства САПР TCAD: интерфейс пользователя
2. Создание и редактирование двух- и трехмерных приборных структур и эмуляция трехмерных технологических процессов.

### **Контрольно-измерительный материал № 11**

1. Системные средства САПР TCAD: построение и редактирование создаваемых проектов.
2. Многомерное моделирование электрофизических характеристик полупроводниковых приборов

### **Контрольно-измерительный материал № 12**

1. Современные методы приборно-технологического проектирования полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем
2. Двух- и трехмерное моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах

### **Примерный перечень дополнительных вопросов к экзамену**

1. Назовите известные Вам САД приборно-технологического проектирования.
2. К какому поколению САПР относится система приборно-технологического моделирования САПР Sentaurus?
3. Назовите основные программные модули для оптимизации расчетной сетки при приборно-технологическом проектировании.
4. Какие программные модули предназначены для визуализации процессов моделирования в САПР TCAD?
5. Какие модели диффузии включены в САПР Sentaurus для моделирования высокотемпературных процессов создания элементов микро- и наноэлектроники?
6. Какие модели ионной имплантации включены в САПР Sentaurus для моделирования процессов создания элементов микро- и наноэлектроники?
7. Какие модели окисления включены в САПР Sentaurus для моделирования процессов окисления при создании элементов микро- и наноэлектроники?
8. Запишите фрагмент командного файла программного модуля Sprocess для моделирования щелевой изоляции.

### **Описание технологии проведения промежуточной аттестации**

Промежуточная аттестация по дисциплине – экзамен. В приложение к диплому вносится оценка *отлично/хорошо/удовлетворительно*.

Оценка уровня освоения дисциплины «Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств» осуществляется по следующим показателям:

- качество и своевременность выполнения лабораторных работ;
- качество и своевременность выполнения курсовых работ;
- полнота ответов на вопросы контрольно-измерительного материала;
- полнота ответов на дополнительные вопросы.

Критерии оценки освоения дисциплины «Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств»:

– оценка *отлично* выставляется при полном соответствии работы студента всем вышеуказанным показателям. Соответствует высокому (углубленному) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы полностью, проявляются и используются систематически, в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей повышенный (продвинутый) уровень;

– оценка *хорошо* выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует одному из перечисленных показателей или в случае предоставления курсовых работ и отчетов по лабораторным работам позже установленного срока. Соответствует повышенному (продвинутому) уровню сформированности компетенций: компетенции в целом сформированы, но проявляются и используются фрагментарно, не в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей пороговый (базовый) уровень;

– оценка *удовлетворительно* выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует любым двум из перечисленных показателей. Соответствует пороговому (базовому) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы в общих чертах, проявляются и используются ситуативно, частично. Данный уровень обязателен для всех осваивающих основную образовательную программу;

– оценка *неудовлетворительно* выставляется в случае несоответствия работы студента всем показателям, его неорганизованности, безответственности и низкого качества работы при выполнении лабораторных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Факт невыполнения требований, предъявляемых к студенту при освоении дисциплины «Приборно-технологическое проектирование элементной базы радиоэлектронных устройств» и отраженных в вышеперечисленных критериях, фиксируется в ведомости оценкой *неудовлетворительно*.

Если студент не осваивает дисциплину в установленном программой объеме и в сроки, определенные графиком учебного процесса, он не допускается к промежуточной аттестации по данному виду учебной работы.

### **20.3 Фонд оценочных средств сформированности компетенций студентов, рекомендуемый для проведения диагностических работ:**

ОПК-3. Способен приобретать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач

ОПК-3.2 Использует полученную информацию при формировании новых подходов к решению инженерных задач в профессиональной сфере деятельности

*Знать:*

- технологию работы на ПК в современных операционных средах, основные методы разработки алгоритмов и программ, структуры данных, используемые для представления типовых информационных объектов, типовые алгоритмы обработки данных;

*Уметь:*

- 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, расширять и углублять своё научное мировоззрение;

- использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций, способствующие повышению эффективности проектных работ при создании проборов и устройств микро- и нанoeлектроники;

*Владеть:*

- профессионально-профильными знаниями в области информационных технологий, использовании современных компьютерных сетей, программных продуктов и ресурсов Интернет для решения задач профессиональной деятельности

**ОПК-4** Способен разрабатывать и применять специализированное программно-математическое обеспечение для проведения исследований и решения инженерных задач

**ОПК-4.1** Осуществляет обоснование и выбор прикладного и специализированного программного обеспечения для проведения научных исследований и решения инженерных задач в своей предметной области

*Знать:*

- специальные программные средства проектирования технологии и топологии приборов, схем и устройств микро- и нанoeлектроники различного функционального назначения;

*Уметь:*

- разрабатывать средства моделирования в специализированных пакетах приборно-технологического проектирования;

*Владеть:*

- современными программными средствами (CAD) моделирования, оптимального проектирования и конструирования приборов, схем и устройств микро- и нанoeлектроники различного функционального назначения

**ОПК-4.2** Применяет современные программные средства (CAD) моделирования, проектирования и приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения конструирования

*Знать:*

- методы расчета, проектирования, конструирования и модернизации электронной компонентной базы с использованием систем автоматизированного проектирования;

*Уметь:*

- моделировать средствами САПР устройства, приборы и системы электронной техники с учетом заданных требований;

*Владеть:*

- средствами САПР при проектировании устройств и приборов электронной техники с учетом заданных требований

**ОПК-4.3** Разрабатывает программно-математическое обеспечение для проведения научных исследований и решения инженерных задач в своей предметной области

*Знать:*

- фундаментальные разделы физики полупроводников и твердотельной электроники, необходимые для решения научно-исследовательских задач проектирования элементов ИС;

*Уметь:*

- осуществлять выбор наиболее оптимальных прикладных программных пакетов для решения соответствующих задач научной и образовательной деятельности;
- применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования приборов элементов ИС;
- разрабатывать физические и математические модели приборов и устройств микро- и наноэлектроники; разрабатывать технологические маршруты их изготовления;

*Владеть:*

- методами проектирования электронной компонентной базы и технологических процессов микроэлектроники;
- методами математического моделирования приборов и технологических процессов с целью оптимизации их параметров

### **Перечень заданий для проверки сформированности компетенций:**

#### **1) закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности):**

**ЗАДАНИЕ 1.** Выберите правильный вариант ответа:

Какие TCAD служат для приборно-технологического проектирования –

- а) CADENCE
- б) Sentaurus**
- в) AutoCad

**ЗАДАНИЕ 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 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) всеми перечисленными факторами в совокупности.**

**ЗАДАНИЕ 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 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 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 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 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 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 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 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 13. 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 14. 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 15. Выберите правильный вариант ответа:

Для расчета электрофизических параметров в Sentaurus TCAD используется:

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

2) открытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

ЗАДАНИЕ 1. К какому поколению САПР приборно-технологического проектирования относится САПР Sentaurus?

**Ответ: III поколение**

ЗАДАНИЕ 2. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента DonorConcentration в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

**Ответ: концентрация донорной примеси**

ЗАДАНИЕ 3. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента TotalConcentration в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

**Ответ: суммарная концентрация примесей**

ЗАДАНИЕ 4. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента eMobility в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

**Ответ: подвижность электронов**

ЗАДАНИЕ 5. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента hMobility в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

**Ответ: подвижность дырок**

ЗАДАНИЕ 6. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента ElectricField в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

**Ответ: напряженность электрического поля**

ЗАДАНИЕ 7. Какая электрофизическая характеристика будет рассчитана при задании аргумента ElectrostaticPotential в блоке Plot командного файла программного модуля SDevice?

**Ответ: электростатический потенциал**

ЗАДАНИЕ 8. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой deposit?

**Ответ: осаждение**

ЗАДАНИЕ 9. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой diffuse?

**Ответ: диффузия**

ЗАДАНИЕ 10. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой etching?

**Ответ: травление**

ЗАДАНИЕ 11. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой implant?

**Ответ: имплантация**

ЗАДАНИЕ 12. Какая технологическая операция программного модуля SProcess описывается командой strip Photoresist?

**Ответ: удаление фоторезиста**

ЗАДАНИЕ 13. Какой параметр процесса ионной имплантации задается аргументом dose в команде implant программного модуля SProcess?

**Ответ: доза**

ЗАДАНИЕ 14. Какой параметр процесса ионной имплантации задается аргументом energy в команде implant программного модуля SProcess?

**Ответ: энергия**

ЗАДАНИЕ 15. Какой параметр процесса ионной диффузии задается аргументом temperature в команде diffuse программного модуля SProcess?

**Ответ: температура**

ЗАДАНИЕ 16. Какой параметр процесса ионной диффузии задается аргументом time в команде diffuse программного модуля SProcess?

**Ответ: время**

3) открытые задания (мини-кейсы, повышенный уровень сложности):

ЗАДАНИЕ 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 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<sup>-3</sup> и имеет ориентацию кремния (100)**

ЗАДАНИЕ 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<sup>-2</sup> и энергией 50 кэВ  
Диффузия при температуре 1000 °С в течение 3 минут в атмосфере сухого кислорода**

ЗАДАНИЕ 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 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 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 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 двухмерной структуры, преобразуя её в трёхмерную, толщиной 1000 мкм

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

**ЗАДАНИЕ 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 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 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/см<sup>2</sup>.

**Ответ:**

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

**ЗАДАНИЕ 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 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 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 =  $6.25 \cdot 10^{14}$  energy = 50**  
**diffuse temperature = 1000 time = 3 O2**

**Критерии и шкалы оценивания:**

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

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

2) открытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

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

3) открытые задания (мини-кейсы, повышенный уровень сложности):

- 5 баллов – задание выполнено верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход выполнения (при необходимости));
- 2 балла – выполнение задания содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода его выполнения (если оно было необходимым), или задание выполнено не полностью, но получены промежуточные (частичные) результаты, отражающие правильность хода выполнения задания, или, в случае если задание состоит из выполнения нескольких подзаданий, 50% которых выполнено верно;
- 0 баллов – задание не выполнено или выполнено неверно (ход выполнения ошибочен или содержит грубые ошибки, значительно влияющие на дальнейшее его изучение).