

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



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
физики полупроводников и микроэлектроники

(Е.Н.Бормонтов)
(Е.Н.Бормонтов)

01.06.2023

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

1. Шифр и наименование направления подготовки/специальности: **11.03.04**

Электроника и наноэлектроника

2. Профиль подготовки/специализации: _____

Интегральная электроника и наноэлектроника

3. Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

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 №5 от 25.05.2023

8. Учебный год: 2026-2027 Семестр: 7

9. Цели и задачи учебной дисциплины: Цель – получение студентами необходимых знаний и навыков в применении компьютерных технологий при приборно-технологическом проектировании, принципах построения и функционирования систем математического моделирования физических и технологических процессов, лежащих в основе функционирования элементной базы микроэлектроники. Основной задачей спецкурса является освоение студентами методологии математического моделирования и приборно-технологического проектирования.

Студенты должны быть готовы использовать полученные в этой области знания, как при изучении смежных дисциплин, так и в профессиональной деятельности, в частности при разработке, изготовлении и применении изделий микроэлектроники и твердотельной электроники.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

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;
- физические и физико-химические основы технологии производства изделий микроэлектроники, физико-технологические и экономические ограничения интеграции и миниатюризации электронной компонентной базы;

уметь:

- применять математические методы, физические и химические законы для решения практических задач;
- применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой и оптической электроники;

владеть:

- навыками критического восприятия информации;
- методами решения дифференциальных и алгебраических уравнений, дифференциального и интегрального исчисления, аналитической геометрии, теории вероятностей и математической статистики, математической логики, функционального анализа;
- методами построения современных проблемно-ориентированных прикладных программных средств;
- новыми технологиями, обеспечивающими эффективность проектов технологических процессов;
- методами экспериментальных исследований параметров и характеристик материалов, приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой и оптической электроники и наноэлектроники, современными программными средствами их моделирования и проектирования;
- навыками работы с информационными базами данных об отечественных и зарубежных электронных компонентах, приемами ввода электронных схем в ПК с помощью стандартных графических пакетов.

10. Место учебной дисциплины в структуре ОПОП: дисциплина относится к факультативным дисциплинам вариативной части, формируемой участниками образовательных отношений, блока Б1 «Дисциплины (модули)», и предусматривает владение методами математической физики, численными методами, знаниями по физике полупроводников и полупроводниковой технологии, программными средствами и компьютерными технологиями; дисциплина формирует знания, умения и компетенции для выполнения выпускных квалификационных работ.

Она базируется на курсах дисциплин, изучаемых в образовательной программе бакалавриата направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»: «Математика», «Физика», «Информационные технологии», «Численные методы», «Методы математи-

ческой физики», «Физические основы электроники», «Основы технологии электронной компонентной базы».

Для освоения дисциплины студент должен:

знать:

- основные понятия и методы математического анализа, аналитической геометрии, линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики;
- технологию работы на ПК в современных операционных средах, основные методы разработки алгоритмов и программ;
- физические и физико-химические основы технологии производства изделий электроники и наноэлектроники, физико-технологические и экономические ограничения интеграции и миниатюризации электронной компонентной базы;

уметь:

- применять математические методы, физические и химические законы для решения практических задач;
- применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования приборов и устройств твердотельной электроники;

владеть:

- навыками критического восприятия информации;
- методами решения дифференциальных и алгебраических уравнений, дифференциального и интегрального исчисления, аналитической геометрии, теории вероятностей и математической статистики;
- методами построения современных проблемно-ориентированных прикладных программных средств;
- новыми технологиями, обеспечивающими эффективность проектов, технологических процессов;
- навыками работы с информационными базами данных об отечественных и зарубежных электронных компонентах, приемами исследования и проектирования элементной базы микро- и наноэлектроники в ПК с помощью компьютерного моделирования.

В результате прохождения данной дисциплины обучающийся должен приобрести знания, навыки, умения, навыки профессиональных компетенций, необходимых для обеспечения трудовых функций А/01.5 «Составление операционного маршрута изготовления изделий микроэлектроники» и А/05.5 «Контроль соблюдения параметров и режимов технологических операций процессов производства изделий микроэлектроники» профессионального стандарта 40.058 Инженер-технолог по производству изделий микроэлектроники.

Данная дисциплина является предшествующей для таких профессиональных дисциплин как «Проектирование интегральных схем», «Топологическое проектирование интегральных схем». Знания, полученные при освоении дисциплины «Системы приборно-технологического проектирования», необходимы при выполнении бакалаврской выпускной квалификационной работы в области микроэлектроники и наноэлектроники.

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-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 подготовке производства материалов и изделий электронной техники	ПК-7.1	Выбирает необходимые параметры технологических процессов производства изделий микроэлектроники	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - параметры и режимы основных технологических процессов, используемых в производстве изделий микроэлектроники; - 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>Уметь:</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;
------	---	--------	--	---

		ПК-7.3	Решает технологические проблемы, возникающие в процессе производства изделий микроэлектроники	<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 оптимизации параметров изделий микроэлектроники низкой и средней сложности
--	--	--------	---	--

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/часах в соответствии с учебным планом — 2/72.

Форма промежуточной аттестации – зачет.

13. Виды учебной работы:

Вид учебной работы	Трудоемкость (часы)	
	Всего	По семестрам
		7 сем.
Аудиторные занятия	42	42
в том числе:		
лекции	14	14
лабораторные работы	28	28
Самостоятельная работа	30	30
Форма промежуточной аттестации - зачет		
Итого:	72	72

13.1 Содержание дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины
1. Лекции		
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.</p> <p>Методы описания элементной базы микроэлектроники и твердотельной электроники на различных этапах проектирования. Поколения САПР TCAD</p>
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
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, планаризация, силицидизация
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
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
1.6	Проектирование элементов и технологических процессов изготовления сверх- и ультрабольших интегральных схем	Современные методы приборно-технологического проектирования полупроводниковых приборов и интегральных СБИС и УБИС
2. Лабораторные работы		
2.1	Введение в САПР приборно-технологического проектирования	
2.2	Основы приборно-технологического проектирования в специализированных пакетах САПР TCAD	<p>Лабораторная работа 1. Изучение состава специализированного пакета приборно-технологического проектирования САПР TCAD</p> <p>Лабораторная работа 2. Освоение интерфейса пользователя. Редактирование проектов для приборно-технологического проектирования виртуальных полупроводниковых структур</p>

		Лабораторная работа 3. Изучение программных средств визуализации результатов экспериментов Лабораторная работа 4. Создание проектов в программной оболочке.
2.3	Приборно-технологическое проектирование элементной базы микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	Лабораторная работа 5. Изучение программы технологического моделирования специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD Лабораторная работа 6. Исследование диффузионных структур средствами программы технологического моделирования Лабораторная работа 7. Исследование ионно-имплантированных структур средствами программы технологического моделирования
2.4	Создание и моделирование приборов микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	Лабораторная работа 8. Изучение программы моделирования электрофизических параметров специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD
2.5	Моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах	Лабораторная работа 10. Изучение программы моделирования термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD Лабораторная работа 9. Исследование электрофизических параметров виртуальных n -МОП-структур в программе пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD
2.6	Проектирование элементов и технологических процессов изготовления сверх- и ультрабольших интегральных схем	Лабораторная работа 11. Проектирование и исследование виртуальной FinFet-структуры средствами САПР TCAD

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Виды занятий (часов)			
		Лекции	Лаб. занятия	Сам. работа	Всего
1	Введение в САПР приборно-технологического проектирования	1		1	2
2	Основы приборно-технологического проектирования в специализированных пакетах САПР TCAD	1	4	3	8
3	Приборно-технологическое проектирование элементной базы микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	4	8	8	20
4	Создание и моделирование приборов микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	4	8	8	20
5	Моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах	2	4	6	12
6	Проектирование элементов и технологических процессов изготовления сверх- и ультрабольших интегральных схем	2	4	4	10
	Итого:	18	28	30	72
	Итого по курсу				72

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

Изучение дисциплины «Системы приборно-технологического проектирования» предусматривает осуществление учебной деятельности состоящей из двух частей: обучения студентов преподавателем и самостоятельной учебной деятельности студентов по изучению дисциплины.

Дисциплина «Системы приборно-технологического проектирования» может реализовываться с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов. 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.

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 положения 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, выполнением лабораторных работ, подготовкой и сдачей зачета по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента.

Самостоятельная работа студентов 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. 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 студента 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 студентов, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Преподаватель, ведущий занятия, организует, направляет самостоятельную работу студентов и оказывает им необходимую помощь. Однако самостоятельность студентов 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 студента по изучению дисциплины, получению необходимых знаний и навыков.

Основой самостоятельной работы служит научно-теоретический курс, комплекс полученных студентом 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 студента 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 студента при изучении «Системы приборно-технологического проектирования» включает в себя:

изучение теоретической части курса	- 6 часов
подготовку к лабораторным занятиям	- 10 часов
написание отчетов по лабораторным работам	- 10 часов
подготовку к зачету	- 4 часов
Итого - 30 часов	

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники [Электронный ресурс] / Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2016 .— 384 с. — Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Конструирование и технология электронных средств» .— Книга из коллекции Лань - Физика .— ISBN 978-5-8114-2002-5 .— <URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=71735 >.
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: https://e.lanbook.com/book/103190 >.
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: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=53689 >.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
4	Приборно-технологическое проектирование элементной базы мощной СВЧ-электроники : учебно-методическое пособие / сост. : Р.П. Алексеев, Е.Н. Бормонтов, Г.В. Быкадорова, В.А. Кожевников .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016 .— 70 с.
5	Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и наноэлектроники : учебно-методическое пособие / сост. : Г.В. Быкадорова, А.Ю. Ткачёв, Е.Н. Бормонтов, Л.А. Битюцкая .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016 .— 119 с.
6	Приборно-технологическое проектирование элементов МДП-ИС : учебно-методическое пособие . Ч. 1 / сост. : Е.Н. Бормонтов, Г. В. Быкадорова, А. В. Быстрицкий, В. К. Лановой, Е. О. Ледовская, А. Н. Цоцорин .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2018 .— 87 с. — Тираж 25. 5,4 п.л.
7	Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и наноэлектроники [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для слушателей Президентской программы повышения квалификации инженер. кадров "Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и наноэлектроники" 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 наноэлектроника с профилями, Интегральная электроника и наноэлектроника, Наноэлектроника] / 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 интранета ВГУ .— Текстовый файл .— Windows 2000; Adobe Acrobat Reader .— <URL: http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-42.pdf >. Моделирование полевых полупроводниковых приборов в САПР ISE TCAD : учебное пособие для вузов / Воронеж.

	гос. ун-т; сост.: В.В. Ассессоров, Г.В. Быкадорова, А.Ю. Ткачев — Воронеж : ЛОП ВГУ, 2007 .— 27 с.
--	--

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 : учебное пособие / Г. В. Быкадорова, Е.Н. Бормонтов, А. Н. Цоцорин .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2019 .— 142 с. — Тираж 50. 8,9 п.л. — ISBN 978-5-9273-2930-4.
2	Приборно-технологическое проектирование элементной базы мощной СВЧ-электроники [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для студ. 1 и 2 к. очной формы , для направлений : 03.04.03 - Радиофизика , 11.03.04 -Электроника и наноэлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост.: Р.П. Алексеев и др.] .— Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016. – 32 с.
3	Приборно-технологическое проектирование полевых полупроводниковых приборов : учебно-методическое пособие / сост. А.В. Быстрицкий, Г.В. Быкадорова, К.Г. Пономарев, А.Ю. Ткачёв .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2017 .— 36 с.
4	Основы работы в среде приборно-технологической САПР SENTAURUS : учебно-методическое пособие / сост. : Р.П. Алексеев, Е.Н. Бормонтов, Г.В. Быкадорова, А.Ю. Ткачёв, А.Н. Цоцорин .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2017 .— 96 с.
5	Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и наноэлектроники : учебно-методическое пособие / сост. : Г.В. Быкадорова, А.Ю. Ткачёв, Е.Н. Бормонтов, Л.А. Битюцкая .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016 .— 119 с.
6	Яковенко Н.В. Самостоятельная работа студентов : методические рекомендации / Н. В. Яковенко, О.Ю. Сушкова .— Воронеж, 2015 .— 22 с.

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

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

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 мате-

матического моделирования, оснащенная 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
1	Введение в САПР приборно-технологического проектирования	ПК-3	ПК-3.3	Устный опрос; тесты 1,2
2	Основы приборно-технологического проектирования в специализированных пакетах САПР TCAD	ПК-3	ПК-3.3	Тесты 3, 17-22; лаб.работы 3,4
3	Приборно-технологическое проектирование элементной базы микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	ПК-7	ПК-7.1	Тесты 4 – 11; лаб.работы 5 – 7
4	Создание и моделирование приборов микроэлектроники в специализированном пакете САПР TCAD	ПК-7	ПК-7.1	Тесты 10 – 14; лаб.работа 11
5	Моделирование термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах	ПК-7	ПК-7.1	Тесты 10 – 14; лаб.работы 8-10
6	Проектирование элементов и технологических процессов изготовления сверх- и ультрабольших интегральных схем	ПК-7	ПК-7.3	Лаб.работа 11
Промежуточная аттестация: форма контроля - зачет				Вопросы -17 к зачету; задания 1-6

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 компьютерного моделирования 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. При компьютерном моделировании 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 8. 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 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, происходящее 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 для DIOS присваивается расширение:

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

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 параметрам, 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»;
- г) «узел исключен из расчета».

Перечень тем лабораторных работ

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

Лабораторная работа 2. Освоение интерфейса пользователя. Редактирование проектов для приборно-технологического проектирования виртуальных полупроводниковых структур

Лабораторная работа 3. Изучение программных средств визуализации результатов экспериментов

Лабораторная работа 4. Создание проектов в программе-оболочке

Лабораторная работа 5. Изучение программы технологического моделирования специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD

Лабораторная работа 6. Исследование диффузионных структур средствами программы технологического моделирования

Лабораторная работа 7. Исследование ионно-имплантированных структур средствами программы технологического моделирования

Лабораторная работа 8. Изучение программы моделирования электрофизических параметров специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD

Лабораторная работа 9. Исследование электрофизических параметров виртуальных n -МОП-структур в программе пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD

Лабораторная работа 10. Изучение программы моделирования термомеханических, электрических, оптических и магнитных явлений в полупроводниковых структурах специализированного пакета приборно-технологического проектирования программ САПР TCAD

Лабораторная работа 11. Проектирование и исследование виртуальной FinFet-структуры средствами САПР TCAD

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

Критерии предварительной оценки работы обучающихся, которые соотносятся с уровнями сформированности компетенций:

- «*зачтено*» выставляется при полном соответствии работы обучающегося всем вышеуказанным показателям. Соответствует высокому (углублённому) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы полностью, проявляются и используются систематически и в полном объёме. Данный уровень обязателен для всех осваивающих ОПОП;

- «*незачтено*» выставляется в случае несоответствия работы обучающегося всем требуемым показателям, неорганизованности, безответственности и низкого качества работы при выполнении заданий, предусмотренных рабочей программой дисциплины «Системы приборно-технологического проектирования».

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета. Текущая аттестация проводится в форме устного опроса по вопросам к зачёту и контролю выполнения лабораторных работ.

20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Перечень вопросов к зачёту

1. Физико-технологическое моделирование в микроэлектронике. Анализ и синтез математических моделей микротехнологий
2. Поколения систем моделирования в микроэлектронике
3. Структура и назначение системы приборно-технологического САПР TCAD Silvaco
4. Структура и назначение системы приборно-технологического САПР TCAD Microtech
5. Структура и назначение системы приборно-технологического САПР ISE TCAD
6. Структура и назначение системы приборно-технологического САПР TCAD Sentaurus
7. Создание проектов в САПР TCAD
8. Основные программные блоки в САПР TCAD
9. Использование приборно-технологического моделирования в разработке и производстве устройств электроники.
10. Метод конечных элементов.
11. Правила создания командного файла для моделирования технологического процесса в Sentaurus Process.
12. Построение технологического процесса с помощью Ligament Flow Editor.
13. Моделирование распределений физических полей полупроводниковых структур в САПР TCAD
14. Отображение результатов моделирования в программных модулях Tecplot SV и Inspect.
15. Организация эксперимента по созданию виртуальных структур в Sentaurus Workbench.
16. Основные принципы оптимизации технологических процессов микроэлектроники.
17. Основные приемы оптимизации конструкции приборов микроэлектроники.

Перечень заданий к зачёту

1. 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 1,5 часа при температуре 1200 °С;
 - нормальная имплантация ионов бора с энергией 100 кэВ и дозой 100 мкКл/см².
2. 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 1,5 часа при температуре 1200 °С;
 - нормальная имплантация ионов бора с энергией 100 кэВ и дозой 100 мкКл/см².
3. Какие последовательности технологических операций моделируют следующие фрагменты командного файла программного модуля Sprocess:

3.1 deposit Nitride thickness = 700<nm>
 etch Nitride etchstop = Oxide rate = 100 type = anisotropic \
 etchstop.overetch = 0.1

3.2 mask name=c_windows segments = {-(1.85+\$L_gate) 1.85+\$L_gate} nega-
 tive
 photo mask = c_windows thickness = 1000<nm>
 etch Oxide etchstop = Silicon rate = 100 type = anisotropic etch-
 stop.overetch = 0.1
 strip Photoresist

3.3 set L_gate00 @L_gate0@
 set L_gate [expr 0.5*\$L_gate00]
 set k1 @k@
 set D1dd 0.125
 set L_gate1 [expr (\$L_gate+0.05)*\$k1]
 set X_R [expr (\$L_gate)+3.5]
 set X_L [expr -(\$L_gate)-3.5]

3.4 region Silicon xlo = Top xhi = Bottom ylo = Left yhi = Right
 init field=Boron concentration = 1e+15 wafer.orient=100

3.5 deposit PolySilicon thickness = 1000<nm>
 mask name = gate_mask segments = {0 0.2+\$L_gate} negative
 photo mask = gate_mask thickness = 1000<nm>
 etch PolySilicon etchstop = oxide type = anisotropic rate = 100
 strip Photoresist
 diffuse temperature = 1100 time = 15 02

3.6 implant Phosphorus dose = 500/1.6e-13 energy = 50 tilt = 0
 diffuse temperature = 1000 time = 3 02

3.7 deposit Nitride type=fill coord=-1.0
 mask name = gate_SI3N4 segments = {-(0.175+\$L_gate)+\$D1dd+\$L_gate1-
 0.02 -(0.175+\$L_gate)+\$D1dd+\$L_gate1+0.02} negative
 photo mask = gate_SI3N4 thickness = 1000<nm>
 etch Nitride etchstop = oxide type = anisotropic rate = 100
 strip Photoresist

```

3.8 contact x = -0.5 y = -($L_gate+0.175)+$L_gate1-0.035 point name = "gate"
   \PolySilicon
   contact x = -0.5 y = $L_gate+0.175-0.025 point name="gate" PolySilicon
   contact x = -0.3 y = -($L_gate+2.675) point name = "source" Aluminum
   contact x = -0.3 y = $L_gate+2.675 point name = "drain" Aluminum
   contact bottom Silicon name = "substrate"

```

4. Какие последовательности моделируют следующие фрагменты командного файла программного модуля `Inspect`:

```

4.1 set dset @plot@
   set data [file rootname $dset]
   proj_load $dset

```

y

```

4.2 cv_create IdVg "$data gate1 InnerVoltage" "$data drain TotalCurrent"
   cv_display IdVg y

```

```

4.3 cv_setCurveAttr IdVg "IdVg" black solid 2 none 3 defcolor 1 defcolor
   gr_setAxisAttr X {Gate Voltage (V)} 12 {} {} black 1 12 0 5 0
   gr_setAxisAttr Y {Drain Current (A)} 12 {} {} black 1 12 0 5 0

```

```

4.4 set VT [ f_VT IdVg ]
   ft_scalar VT $VT

```

```

4.5 set VT1 [ f_VT1 IdVg ]
   ft_scalar VT1 $VT1

```

```

4.6 set S [f_gm IdVg]
   ft_scalar S $S

```

```

4.7 set Rout [cv_compute "vecvaly( 1/diff(<idvd5>), vecvalx(<idvd5>,
   vecmax(<idvd5>))]" A A A A]
   ft_scalar Rout $Rout

```

```

4.8 set Ron [cv_compute "vecvaly( 1/diff(<idvd5>), vecvalx(<idvd5>,
   vecmin(<idvd5>))]" A A A A]
   ft_scalar Ron $Ron

```

5. 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 }

```

6. Какие электрофизические 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}?

Промежуточная аттестация по дисциплине – зачет. В приложение к диплому вносится оценка *зачтено*. Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета.

Оценка уровня освоения дисциплины «Системы приборно-технологического проектирования» осуществляется по следующим показателям:

- предварительная оценка качества и своевременности выполнения лабораторных работ;
- полнота ответов на вопросы к зачету;
- правильность выполнения задания к зачёту.

Критерии оценки работы обучающихся, которые соотносятся с уровнями сформированности компетенций:

- «*зачтено*» выставляется при полном соответствии работы обучающегося вышеуказанным показателям. Соответствует высокому (углублённому) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы полностью, проявляются и используются систематически и в полном объёме. Данный уровень обязателен для всех осваивающих ОПОП;
- «*незачтено*» выставляется в случае несоответствия работы обучающегося требуемым показателям, неорганизованности, безответственности и низкого качества работы при выполнении заданий, предусмотренных рабочей программой дисциплины «Системы приборно-технологического проектирования».

Факт невыполнения требований, предъявляемых к студенту при освоении дисциплины «Системы приборно-технологического проектирования» и отраженных в вышеперечисленных критериях, фиксируется в ведомости оценкой *незачтено*.

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.