

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
Институт физики

УТВЕРЖДАЮ
Директор Института физики,
д.ф.-м.н., профессор


С.Б. Вениг
"20" 09 2021 г.

Рабочая программа дисциплины
Микроэлектроника и наноэлектроника

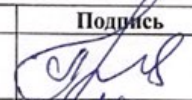
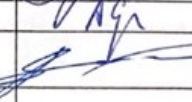

Направление подготовки бакалавриата
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Профиль подготовки бакалавриата
«Физика и технология твердотельных
электронных микро- и наноструктур»

Квалификация (степень) выпускника
Бакалавр

Форма обучения
очная

Саратов,
2021 г.

Статус	ФИО	Подпись	Дата
Преподаватель-разработчик	Терин Д.В.		10.09.21
Председатель НМК	Скрипаль Ан.В.		10.09.21
Заведующий кафедрой	Вениг С.Б.		10.09.21
Специалист Учебного управления			

1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Микроэлектроника и наноэлектроника» является формирование у студентов комплекса профессиональных знаний и умений, усвоение физических принципов создания и функционирования микроэлектронных и наноэлектронных устройств и интегральных схем, путей их создания на основе физической, схемотехнической и технологической интеграции, принципиальных и практических возможностей управления физическими и химическими свойствами структур, с размерами меньшими, классических и квантовомеханических характеристических длин, использования особенностей наноструктур для получения, обработки и хранения информации, причин деградации и основ прогнозирования надёжности и предельных возможностей микро- и наноэлектронных устройств по массогабаритным характеристикам, энергопотреблению, быстродействию и производительности.

Задачами освоения дисциплины являются:

- формирование и углубление знаний о невозможности на основе использования дискретных элементов преодолеть противоречия между необходимостью всё ускоряющейся обработки, получения и хранения постоянно растущих объёмов данных при росте надёжности и снижении стоимости; усвоение и понимание физической основы преодоления противоречия микроэлектроникой использованием её базовых принципов – интегральная микросхема (ИМС) – монолит, создаваемая на основе физической, схемной и технологической интеграции;
- приобретение знаний и понимания адекватности требованиям развития цивилизации основных законов развития микроэлектроники – экспоненциального роста сложности ИМС и экспоненциального снижения стоимости без снижения её надёжности и изменения массогабаритных характеристик;
- приобретение знаний и умений выявления факторов, определяющих предельные возможности микро- и наноэлектроники по массогабаритным характеристикам, энергопотреблению, быстродействию, производительности и объёму памяти;
- формирование и углубление знаний об ИМС на основе биполярных транзисторов, умений исследовать влияние интеграции на физические процессы, протекающие в активных и пассивных элементах, знаний о возникновении и влияния паразитных связей, путях конструктивной и технологической эволюции ИМС на биполярных транзисторах;
- формирование и углубление знаний об ИМС на основе униполярных – МДП транзисторов, знаний о принципиальных отличиях в требованиях к материалам и структурам при создании ИМС на основе биполярных и МДП транзисторов, комплементарных схемах и устройствах памяти, путях уменьшения длины канала и повышения подвижности носителей заряда и знаний о путях конструктивной и технологической эволюции МДП ИМС;
- формирование знаний о путях преодоления противоречия между ограниченностью круга материалов и необходимостью широкого спектра их свойств в ИМС на примерах преодоления тирании и проблем создания многослойных межсоединений, повышения подвижности носителей заряда в канале, использования поликристаллического кремния, диэлектриков с высокой проницаемостью и др.;
- активация знания и владение основными законами, используемыми при проектировании, расчёте и анализе активных элементов ИМС (уравнения плотности токов, непрерывности, Пуассона, плотности заряда) и их применения в алгоритмах проектирования.
- активация представлений о квантово-волновом дуализме, основных свойствах волновой функции, уравнении Шрёдингера, связи между импульсом и волновым числом, соотношением неопределённостей Гейзенберга и туннельном эффекте;
- активация знаний и представлений о влиянии топологии на зонный энергетический спектр, плотность состояний, характер и особенности переноса, термодинамических и химических свойствах нанобъектов, в том числе у «неравноплечей» квантовой ямы, одно и двубарьерных структурах пониженной размерности;

- формирование знаний о КМДП на основе наногетероструктур с механическими напряжениями, полностью обеднёнными нанометровыми полупроводниковыми и субнанометровыми диэлектрическими неоднородными слоями;
- формирование представлений об одноэлектронных переходах, одноэлектронных транзисторах и возможностях ИМС на их основе;
- формирование представлений о массопереносе в структурах пониженной размерности, возможностях создания мемристоров и логических ИМС на их основе;
- формирование представлений о фазовых переходах в наноструктурах и создании ИМС памяти на этой основе;
- формирование знаний о базовых понятиях надёжности, об основных процессах и причинах деградации ИМС, влияния межсоединений, контактных узлов и корпусирования ИМС на их надёжность, методах анализа и прогнозирования надёжности и адаптивном синтезе ИМС;
- формирование представлений о перспективных направлениях развития микро- и нанoeлектроники.

2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

Дисциплина «Микроэлектроника и нанoeлектроника» относится к обязательной части блока Б1 «Дисциплины (модули)» и изучается в 8-м семестре студентами очной формы обучения института физики СГУ, обучающимися по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника». Материал дисциплины опирается на ранее приобретенные студентами знания по физике, математике, химии, термодинамике, электродинамике, знания, полученные и получаемые по курсам «Физика полупроводников», «Физико-химические основы технологии электроники и нанoeлектроники», «Технология материалов и структур электроники», «Твердотельная электроника», «Квантовая и оптическая электроника», «Микросхемотехника», «Принципы построения и защиты информационных систем», «Квантовая теория твёрдого тела» и подготавливает студентов к выполнению выпускной квалификационной работы.

3. Результаты обучения по дисциплине

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
ОПК-1. Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	<p>1.1_Б.ОПК-1. Понимает важность применения фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов.</p> <p>2.1_Б.ОПК-1. Аргументированно применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера.</p> <p>3.1_Б.ОПК-1. Использует знания физики и математики при решении конкретных задач инженерной деятельности.</p>	<p><u>Знать</u> основные положения, законы и методы естественных наук и математики, используемые в области микроэлектроники и нанoeлектроники; основные физические процессы, протекающие в структурах микроэлектроники и нанoeлектроники и являющиеся физической основой принципа действия устройств;</p> <p><u>Уметь</u> аргументированно применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера в области микроэлектроники и нанoeлектроники;</p>

<p>ОПК-2. Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных</p>	<p>1.1_Б.ОПК-2. Находит и критически анализирует информацию, необходимую для решения поставленной задачи.</p> <p>2.1_Б.ОПК-2. Рассматривает возможные варианты решения задачи, оценивая их достоинства и недостатки.</p> <p>4.1_Б.ОПК-2. Аргументированно выбирает способы и средства измерений и проведения экспериментальных исследований.</p> <p>5.1_Б.ОПК-2. Способен применять методы обработки и представления полученных данных и оценки погрешности результатов измерений.</p>	<p>находить и критически анализировать информацию, необходимую для решения поставленной задачи;</p> <p>рассматривать возможные варианты решения задачи, оценивая их достоинства и недостатки;</p> <p>решать конкретные задачи по проведению исследований характеристик приборов микроэлектроники и нанoeлектроники</p> <p>оценивать возможное влияние изменения структур на основные параметры и характеристики;</p> <p>анализировать, рассчитывать и экспериментально исследовать анализировать и оптимизировать параметры и характеристики структур микроэлектроники и нанoeлектроники;</p> <p><u>Владеть</u> знаниями физики и математики, необходимыми при решении конкретных задач инженерной деятельности в области микроэлектроники и нанoeлектроники;</p>
<p>ПК-3 Способен аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику теоретического и экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения</p>	<p>1.1_Б. ПК-3. Аргументированно применяет методики проведения теоретических и экспериментальных исследований параметров и характеристик узлов и блоков установок электроники и нанoeлектроники</p> <p>2.1_Б. ПК-3. Решает конкретные задачи по проведению исследований характеристик электронных приборов различного функционального назначения</p> <p>3.1_Б. ПК-3. Обрабатывает и анализирует результаты теоретических и экспериментальных исследований, определяет элементы новизны в разработке</p>	<p>методиками, методами и основными подходами к описанию и анализу, экспериментальному исследованию устройств микроэлектроники и нанoeлектроники;</p> <p>методами обработки, анализа и представления результатов теоретических и экспериментальных исследований, оценки погрешности результатов измерений</p>

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Формы промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лек	Лабораторные		Пр	СРС	
					Общая трудоемкость	Из них – практическая подготовка			
1.	Введение.	8	1	2				4	Устный опрос, собеседование
2.	Предельные задачи микро- и нанозлектроники.	8	2-3	2	2	2		8	устный отчёт по самостоятельной работе
3.	Полупроводниковые ИМС.	8	3-4	2	2	2		8	Предварительный устный и окончательные устный и письменные отчёты по лабораторной и самостоятельной работе
4.	МДП транзисторы в ИМС на основе микро- и наноструктур	8	5-6	2	4	4		8	Предварительный устный и окончательные устный и письменные отчёты по лабораторной и самостоятельной работе
5.	Межсоединения в ИМС, тиражирование межсоединений и проектирование ИМС.	8	6-7	4	4	4		8	Предварительный устный и окончательные устный отчёты по самостоятельной работе
6.	Гибридные и совмещённые ИМС	8	7-8	4	4	4		8	Предварительный устный и окончательные устный отчёты по самостоятельной работе
7.	Основные особенности наноструктур.	8	9-10	4	4	4		8	Предварительный устный и окончательные устный и письменные отчёты по лабораторной и самостоятельной работе

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Формы промежуточной аттестации (по семестрам)
8.	Нерезонансное и резонансное туннелирование и электронные устройства на этой основе	8	11	2	2	2	8	Устный опрос
9.	Термодинамические свойства и особенности фазовых переходов в структурах с элементами пониженной размерности и устройства обработки и хранения информации.	8	12	2	2	2	8	Предварительный устный и окончательный отчёты по самостоятельной работе
10.	Микро- и наномеханические системы	8	13	2	2	2	10	Предварительный устный и окончательный письменный отчёты по самостоятельной работе
11.	Заключительные операции создания ИМС	8	14	2	2	2	10	Предварительный и окончательные устные отчёты по самостоятельной работе, реферат
	Итого:	8		28	28	28	88	
	Контроль	8				36		
	Промежуточная аттестация	8						Экзамен
	Общая трудоемкость дисциплины					180		

Содержание дисциплины

1. Введение.

Необходимость преодоления противоречия между объёмом информации, скоростью его увеличения и способами, и стоимостью её обработки и использования на основе дискретных элементов; Отличительные особенности микроэлектроники, наномикроэлектроники и традиционных методов создания аппаратуры из дискретных элементов.

Проблема надёжности, идея монолита и интеграции,

- базовый объект интегральная микросхема (ИМС);
- метод – физическая, схемная и технологическая интеграция, обеспечивающие заданные надёжности, стоимостные и эксплуатационные параметры не отдельного прибора, а ИМС.

Основные феноменологические законы развития микроэлектроники. Экспоненциальное увеличение числа элементов и экспоненциальное снижение стоимости аппаратуры при со-

хранении надёжности и массогабаритных характеристик. Динамизм, наукоёмкость, адаптивный синтез, рост стоимости производства. Классификация и основные типы и направления создания и использования ИМС – полупроводниковые, гибридные и совмещённые схемы. Цифровые и аналоговые, корпусные и бескорпусные и т.п. Маркировка и обозначения.

2. Предельные задачи микро- и наноэлектроники.

Случайные факторы.

Связь уровня легирования, флуктуации концентрации примесей, числа элементов в схеме, допусков на параметры элементов, требуемого выхода годных и размеров элементов Модельное рассмотрение.

Принципиальные ограничения погрешностей в линейных размерах элементов. Квантовомеханическое ограничение погрешности линейного размера. Дифракционные ограничения погрешности размера, и глубины резкости. Длины волн инструментов и числовые апертуры. Ограничения и трудности в использовании коротковолновых излучений, электронов и ионов. Проблемы совмещения. и само совмещения.

Предельные возможности и пути преодоления ограничений, определяемых случайными факторами, повышение уровня легирования и его ограничения, переход к обеднению, явлениям и материалам, независимым от концентрации примесей, иммерсия, импринтинг, само-совмещение, биообъекты.

Регулярные факторы.

Скейлинг, примеры проведения, ограничения по зависимостям свойств от полей и напряжений и размерным эффектам.

Квантовомеханические, термодинамические и пороговые ограничения минимальной энергии переключения и быстродействия отдельного элемента.

Расчёты зависимостей минимального энергопотребления, размеров и времен переключения, плотности размещения элементов аппаратуры и производительности при заданной надёжности на основе модели, учитывающей надбарьерные и туннельные переходы. Влияние размеров элементов на предельные возможности устройств обработки информации. Проблема теплоотвода и пути её разрешения. Сопоставление параметров элементов и ИМС на основе различных явлений.

3. Полупроводниковые ИМС.

Анализ требований к базовым материалам, подложкам и структурам. Основа полупроводниковых ИМС – широкозонный локально модифицируемый структурно и химически полупроводниковый материал с управляемым содержанием мелких и глубоких примесных уровней, гомо- и гетероэпитаксиальные структуры на его основе. Сопоставление германия, кремния и арсенида галлия. Геттерирование. Базовые процессы. Методы изоляции элементов в ИМС. Типовая ИМС на основе биполярных транзисторов (БТ). Типы БТ в ИМС и их принципиальные отличия от дискретных БТ Особенности пассивных элементов в ИМС на основе БТ. Планарно-эпитаксиальные транзисторы в ИМС, паразитные связи и элементы.

Эволюция БТ в ИМС от планарно-эпитаксиальных к БТ на основе КНИ, как путь снижения и исключения влияния паразитных элементов и связей, обеспечения самосовмещения и высокой степени интеграции. Щелевая технология и БТс комбинированной изоляцией. Последовательное снижение сопротивления базы и паразитных ёмкостей, обеспечение возможностей самосовмещения. БТ с непосредственным контактом в базе. БТ с полной диэлектрической изоляцией на основе структур КНИ. Влияние и ограничения повышения уровня легирования и уменьшения размеров. Принципиальные недостатки БТ в ИМС.

4. МДП транзисторы в ИМС на основе микро- и наноструктур.

Типовые топология, характеристики МДП транзисторов и их связи со свойствами материалов и конструктивными особенностями. Ток в канале МДП транзистора в открытом и закрытом состояниях. Проблемы воспроизводимости и управления пороговым напряжением. Поверхностные состояния и заряды в МДП структуре. Ионнолегированные МДП транзисторы. Подвижность носителей заряда в канале МДП транзистора. Комплементарные МДП транзисторные структуры. Элементы памяти на основе МДП транзисторов. Длина канала, влияние

на характеристики ИМС, возможности и пути уменьшения и возникающие эффекты. Проблема диэлектрика и переход к материалам с высокой диэлектрической проницаемостью. Эволюция МДП транзисторов в ИМС. Пути повышения подвижности носителей заряда в каналах МДП транзисторов. КНИ и плавниковые структуры МДП.

Возможности создания МДП транзисторов и ИМС на основе графена.

5. Межсоединения в ИМС, тирания межсоединений и проектирование ИМС.

Рост числа элементов в ИМС, количества контактных площадок, длины и площади межсоединений, требований к электрофизическим характеристикам и деградационной стабильности межсоединений. Правило Рендта. Переход от однослойной к многослойной и многоуровневой системам межсоединений. Типичные проблемы и пути их разрешения на примере использования меди в межсоединениях.

6. Гибридные и совмещённые ИМС.

Типовые решения. Примеры топологии и расчёта сопротивления и ёмкости с подгоняемыми параметрами. Сопоставление параметров пассивных элементов в монолитных полупроводниковых и в гибридных и совмещённых схемах. Принципиальные преимущества и недостатки гибридных и совмещённых схем.

7. Основные особенности наноструктур.

Классические и квантовомеханические характеристические длины. Зависимость энергетического спектра и плотности состояний носителей заряда от топологических параметров объектов и свойств соседствующих сред; устройства микро- и нанoeлектроники на этой основе.

8. Нерезонансное и резонансное туннелирование и электронные устройства на этой основе.

9. Термодинамические свойства и особенности фазовых переходов и массопереноса в структурах с развитой поверхностью, элементами пониженной размерности и устройства сенсорики, обработки и хранения информации.

10. Микро- и нанoeлектромеханические системы

11. Заключительные операции создания ИМС.

Надёжность ИМС, базовые понятия надёжности, основные процессы и причины деградации ИМС, влияние межсоединений, контактных узлов и корпусирования ИМС на надёжность, методы анализа и прогнозирования надёжности и адаптивный синтез ИМС.

Примерный перечень лабораторных работ

1. Изоляция элементов полупроводниковых ИМС на основе p-n переходов
2. Комбинированная и полная диэлектрическая изоляция в полупроводниковых ИМС
3. Комплексное определение параметров структуры МДП
4. Эллипсометрия подзатворного диэлектрика
5. Структуры кремния с элементами пониженной размерности
6. Изменение энергетического зонного спектра при понижении размерности
7. Контролируемое непосредственно в ходе процесса получения создание многослойной наноструктуры

5. Образовательные технологии, применяемые при освоении дисциплины

Во время аудиторных занятий проводятся лекции с использованием ПК и мультимедийного проектора, демонстрируются слайды, аппаратура и проводятся натурные эксперименты непосредственно из лабораторий с помощью Skype, Discord, Google Meet.

При реализации различных видов учебной работы (лекции, лабораторные занятия, самостоятельная работа) используются следующие современные образовательные технологии:

- информационно-коммуникационные технологии;
- проблемное обучение.

Предусматриваются встречи с научными сотрудниками и разработчиками, выполнение ряда лабораторных работ непосредственно в научных лабораториях.

Лекционные занятия проводятся в традиционной и интерактивной формах. При проведении лекционных занятий используется ПК и мультимедийный проектор. Используемые в ходе лекций материалы в электронном виде передаются студентам по окончании лекции, или предварительно размещаются на сайте факультета.

При проведении лабораторных занятий выполняются натурные и вычислительные эксперименты в лабораторном практикуме и непосредственно в научных лабораториях университета.

Практическая подготовка при реализации данной дисциплины направлена на формирование практических навыков и компетенций по профилю образовательной программы в процессе выполнения лабораторных работ, в ходе которых студенты осваивают физических принципов создания и функционирования микроэлектронных и нано-электронных устройств и интегральных схем, путей их создания на основе физической, схемотехнической и технологической интеграции, принципиальных и практических возможностей управления физическими и химическими свойствами структур, с размерами меньшими, классических и квантовомеханических характеристических длин, использования особенностей наноструктур для получения, обработки и хранения информации, причин деградации и основ прогнозирования надёжности и предельных возможностей микро- и наноэлектронных устройств по массогабаритным характеристикам, энергопотреблению, быстродействию и производительности.

Условия обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья:

- предоставление инвалидам по зрению или слабовидящим возможностей использовать крупноформатные наглядные материалы;
- организация коллективных занятий в студенческих группах с целью оказания помощи в получении информации инвалидам и лицам с ограниченными возможностями по здоровью;
- проведение индивидуальных коррекционных консультаций для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья.
- использование индивидуальных графиков обучения
- использование дистанционных образовательных технологий

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Самостоятельная работа студентов по дисциплине проводится в течение всего периода изучения и заключается в чтении и изучении литературы, в выполнении заданий преподавателя по контрольным вопросам.

Необходимым условием овладения предметом является возможно полное знание содержания используемых понятий и областей их корректного применения:

- следует проводить анализ материала и стремиться установить не ясные вопросы и чётко формулировать что же не понятно, не убедительно, не доказано;
- уровень овладения предметом определяется способностью использовать знания для решения конкретных задач, поэтому следует не только решать рекомендуемые задачи, но стремиться ставить и решать задачи по изучаемому материалу;
- помнить, что отличительной особенностью изучаемого предмета является необычайно высокий динамизм, поэтому широко использовать Интернет для получения новой информации;
- для качественного усвоения материала лекций разбирать вопросы, изложенные в каждой очередной лекции, до следующей, стремиться восстановить необходимые фундаментальные знания. по непонятым деталям консультироваться у лектора,
- при подготовке к выполнению и отчетам по лабораторным работам тщательно изучать описание работы, задавать уточняющие вопросы преподавателю и дежурному инженеру,

иметь отдельную тетрадь по лабораторному практикуму, для выполнения заданий и оформления отчетов;

- задания, которые даются лектором во время лекции по отдельным вопросам, обязательны для выполнения, и качество их выполнения будет проверяться во время зачета и экзамена.

Примерный перечень предлагаемых тем рефератов:

1. Предельные задачи микро- и нанoeлектроники.
2. Полупроводниковые ИМС.
3. Конструктивно- технологическая эволюция ИМС на основе биполярных транзисторов и принципиальные недостатки биполярных транзисторов в ИМС.
4. МДП транзисторы в ИМС на основе микро- и наноструктур.
5. Методы формирования квантово-размерных структур и их основные особенности.
6. Физические особенности нанoeлектронных структур и основы создания систем получения и обработки информации.
7. Термодинамические свойства и особенности фазовых переходов и массопереноса в структурах с элементами пониженной размерности и устройства обработки и хранения информации.
8. Микро- и нанoeлектромеханические системы.
9. Надёжность и качество ИМС.
10. Основы проектирования ИМС.
11. Ожидаемые направления развития микроэлектроники и нанoeлектроники.

Конкретная тема реферата и его узловые задачи выдаются по результатам собеседования со студентом в ходе первых занятий с учетом направленности научной работы студента и его пожеланий.

Рефераты выполняются под руководством преподавателя и должны содержать элементы литературного обзора по теме, анализа в соответствии с конкретной спецификой выбранной темы. Рефераты следует выполнять в течение всего семестра с периодическим обсуждением результатов с преподавателем.

Контрольные вопросы для проведения промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

1. Основные особенности ИМС. Сопоставление ИМС с дискретными элементами схем. Классификация ИМС.
2. Комплементарные МДП – структуры в ИМС.
3. Предельные задачи микроэлектроники. Влияние флуктуаций свойств материалов на минимальные размеры и параметры элементов в ИМС.
4. Пассивные компоненты полупроводниковых ИМС.
Резисторы в ИМС на основе биполярных транзисторов.
5. Предельные задачи микроэлектроники. Тепловыделение и его влияние на параметры ИМС.
6. Межсоединения в полупроводниковых ИМС.
7. Предельные задачи микроэлектроники. Факторы, ограничивающие быстродействие и производительность ИМС.
8. Основы проектирования ИМС. Трассировка межсоединений.
9. Предельные задачи микроэлектроники. Минимальное энергопотребление.
10. Причинный подход к деградации ИМС. Компоненты ненадёжности.
11. Предельные задачи микроэлектроники. Плотность упаковки и её влияния на параметры компонентов и надёжность ИМС
12. Многослойные межсоединения в полупроводниковых ИМС.
13. Предельные задачи микроэлектроники. Ограничения быстродействия и производительности ИМС.
14. Процессы, вызывающие деградацию полупроводниковых ИМС
15. Сопоставительный анализ ИМС на биполярных и МДП транзисторах.
16. Изоляция компонентов в полупроводниковых ИМС и её влияние на свойства элементов.

17. Биполярные транзисторы в ИМС. Основные конструктивные особенности, типы биполярных транзисторов в ИМС.
18. Сопоставьте параметры ёмкостей в полупроводниковых ИМС и их дискретных аналогов.
19. Основы проектирования полупроводниковых ИМС. Основные уравнения и области их применимости при проектировании полупроводниковых ИМС.
20. Плотность поверхностных состояний и её влияние на МДП транзисторы.
21. Факторы, определяющие пороговые напряжения МДП транзисторов.
22. Комплементарные схемы в ИМС.
23. Влияние подвижности носителей заряда на параметры ИМС на основе МДП транзисторов. Пути повышения подвижности в наноструктурах.
24. Пути совершенствования ИМС на основе МДП транзисторов
25. Экономически целесообразная площадь полупроводниковой ИМС.
26. Паразитные элементы транзисторов в ИМС и пути их исключения.
27. Надёжность электронных устройств. Методы резервирования. Мажоритарная логика.
28. Пути совершенствования ИМС на основе биполярных транзисторов. Ограничения по повышению уровня легирования базовых и эмиттерных областей.
29. Основные физико-химические процессы деградации твердотельных структур.
30. Предельные задачи микроэлектроники. Принципиальные ограничения литографии. Неровность края и минимальные размеры элементов в ИМС.
31. Предельные задачи микроэлектроники. Ограничения литографии. Многослойные резисты.
32. Влияние заряда на пороговое напряжение МДП транзисторов. «Память» на основе транзисторов с униполярной проводимостью.
33. Надёжность ИМС. Возможности ускоренных испытаний и прогнозирования надёжности.
34. Пути повышения быстродействия ИМС на биполярных транзисторах.
35. МДП-транзисторы в ИМС. Принцип действия. Основные характеристики и их связь со свойствами материалов.
36. Проектирование ИМС. Алгоритм Гуммеля
37. Методы прогнозирования надёжности ИМС. Компоненты ненадёжности.
38. Паразитные элементы биполярных транзисторов в ИМС и пути снижения их влияния.
39. Память в ИМС на основе МДП структур.
40. Предельные задачи микроэлектроники. Минимальное энергопотребление и производительность ИМС.
41. Пути повышения быстродействия МДП транзисторов в ИМС.
42. Возможности ускоренных испытаний и прогнозирования надёжности ИМС.
43. МДП – транзисторы в ИМС. Ограничения быстродействия и пути их преодоления. Геттероструктуры.
44. Расчёт и прогнозирование надёжности на основе компонент ненадёжности.
45. Пути совершенствования ИМС на основе МДП транзисторов. Ограничения длины канала.
46. Прогнозирование надёжности ИМС.
47. Предельные задачи микроэлектроники. Ограничения плотности размещения элементов в ИМС.
48. Трассировка межсоединений в ИМС. Волновой алгоритм Ли.
49. Недостатки алюминия как материала межсоединений в ИМС. Многослойные межсоединения.
50. Физико-топологическое проектирование ИМС и алгоритм Гуммеля.
51. Правило Рента и межсоединения в полупроводниковых ИМС.
52. Элементы памяти ИМС на основе МДП транзисторов.
53. Характеристические длины. Механизмы токопереноса.
54. Энергетический спектр и плотность состояний в структурах с пониженной размерностью.

55. Влияние соседствующих сред на энергетический спектр в неравноплечей потенциальной яме.
56. Туннелирование в структурах с пониженной размерностью и электронные устройства на этой основе.
57. Влияние механических напряжений в материале на его зонный энергетический спектр, создания напряжённых структур с повышенной подвижностью носителей заряда в канале МДП транзистора.
58. Плавниковый (FINFET) транзистор

7. Данные для учета успеваемости студентов в БАРС

Таблица 1.1 Таблица максимальных баллов по видам учебной деятельности.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Семестр	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Самостоятельная работа	Автоматизированное тестирование	Другие виды учебной деятельности	Промежуточная аттестация	Итого
8	15	20	0	10	20	0	35	100

Программа оценивания учебной деятельности студента

8 семестр

Лекции

Посещаемость, опрос, активность и др. за один семестр – от 0 до 15 баллов.

Лабораторные занятия

Посещаемость, отчёты по лабораторным работам – от 0 до 30 баллов.

Практические занятия:

Не предусмотрены.

Самостоятельная работа

Оформление отчётов по лабораторным работам, выполнение заданий на самостоятельную работу – от 0 до 20 баллов.

Автоматизированное тестирование

Не предусмотрено.

Другие виды учебной деятельности:

Не предусмотрены.

Промежуточная аттестация (экзамен)

Экзамен проводится в устной форме и предполагает ответ на 2 вопроса билета.

При проведении промежуточной аттестации

ответ на «отлично» оценивается от **21** до **35** баллов;

ответ на «хорошо» оценивается от **11** до **20** баллов;

ответ на «удовлетворительно» оценивается от **6** до **10** баллов;

ответ на неудовлетворительно оценивается от **0** до **5** баллов.

Таким образом, максимально возможная сумма баллов за все виды учебной деятельности студента за 8 семестр по дисциплине «Микроэлектроника и нанoeлектроника» составляет 100 баллов.

Таблица 2.2 Таблица пересчета полученной студентом суммы баллов по дисциплине «Микроэлектроника и нанoeлектроника» в оценку (экзамен):

86 - 100 баллов	«отлично»
70 - 85 баллов	«хорошо»
50 - 69 баллов	«удовлетворительно»
меньше 50 баллов	«неудовлетворительно»

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) литература:

1. Нано- и микросистемы с обратимо перестраиваемыми размещением и свойствами элементов [Текст] : учебное пособие для студентов и магистрантов, обучающихся по направлениям "Электроника и нанoeлектроника", "Материаловедение и технологии материалов", "Биотехнические системы и технологии", "Инноватика" / Д. В. Терин, С. Б. Вениг, Е. М. Ревзина ; Саратов. нац. исслед. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. - Саратов: Издательство Саратовского университета, 2018 - **Ч. 1.** - Саратов: Издательство Саратовского университета, 2018. - 77, [3] с. (38 экз.)
2. Щука А. А. ЭЛЕКТРОНИКА В 4 Ч. ЧАСТЬ 2 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА [Электронный ресурс]: Учебник. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2019. - 326 с. ЭБС «Юрайт»
3. Нанoeлектроника [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. А. Щука. - 5-е изд. - Москва: Издательство "Лаборатория знаний", 2020. - 345 с. **Гриф УМО** — ЭБС «ЛАНЬ». — URL: <https://e.lanbook.com/book/135510>
4. Зебрев, Г.И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники. [Электронный ресурс] — 4-е изд. — М. : Издательство "Лаборатория знаний", 2020. — 243 с. — ЭБС «ЛАНЬ». — URL: <https://e.lanbook.com/book/135537>
5. Ефимов, И.Е. Основы микроелектроники. [Электронный ресурс] / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. — 3-е изд. — СПб.: Лань, 2022. — 384 с. — ЭБС «ЛАНЬ» — URL: <https://e.lanbook.com/book/210218>
6. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: в 2 т. / под общ. ред. Ю.Н. Коркишко. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2010. – Т.1: Физико-химические основы технологии микроелектроники / Ю.Д. Чистяков, Ю.П. Райнова. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2010. – 392 с. (15 экз.)
7. Смирнов, Ю.А. Физические основы электроники. [Электронный ресурс] / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. — 2-е изд., испр. — СПб.: Лань, 2022. — 560 с. ЭБС «ЛАНЬ». — URL: <https://e.lanbook.com/book/211208>
8. Нанотехнологии в микроелектронике. Нанолитография - процессы и оборудование: учебно-справочное руководство / В. Ю. Киреев. - Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2016. – 320 с. (5 экз.)

б) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Операционные системы, программные средства офисного назначения:

1. Microsoft Windows XP Professional, Microsoft Windows 7, Microsoft Windows 8 – лицензия № 61137891 от 09.11.2012
2. Microsoft Office профессиональный 2007 (Word, Excel, Access, PowerPoint, Outlook, InfoPath, Publisher) – лицензия № 42226296
3. Microsoft Office Standart 2010 – лицензия № 67334291
4. Антивирус Касперского 6.0 для Windows Workstation

Специализированное программное обеспечение:

1. QuantumWise Virtual Nano Lab 12 – лицензия № 20120636
2. LabVIEW 8.5 – лицензия M71X16241 от 28.05.2010
2. Wolfram Mathematica 7 – лицензия L3266-6743 от 12.02.2010
3. PTC Mathcad 14 – лицензия №2527097 от 27.02.2010
4. The MathWorks MATLAB – лицензия № 577478 от 27.02.2010
5. Multisim Education – лицензия M64X94555 от 03.02.2007

Электронные ресурсы

1. Каталог образовательных Интернет-ресурсов. – Режим доступа: <http://window.edu.ru/>
2. Зональная научная библиотека им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. – Режим доступа: <http://library.sgu.ru/>
3. Биленко Д.И. Эволюция активных элементов микроэлектроники: Электронное учебное пособие. – Саратов, 2010. – 95с. – Режим доступа: <http://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2014/02/09/evolyuciya.pdf>
4. Биленко Д.И., Терин Д.В. Нано- и микросистемы с обратимо перестраиваемым размещением и свойствами элементов: Электронное учебное пособие. – Режим доступа: <http://www.sgu.ru/node/19146/mems>

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Лекционные занятия по дисциплине «Микроэлектроника и наноэлектроника» проводятся в аудиториях, учебных и научных лабораториях, оснащенных компьютерной и мультимедийной техникой.

Оборудование и возможности учебно-научной лаборатории микроэлектроники и описаны на сайте лаборатории.

В частности, студенты имеют возможность использовать при выполнении лабораторных работ:

Инженерно-исследовательский участок (общая площадь 36 кв.м.) с приточно-вытяжной вентиляцией с механическим побуждением и отдельными (автономными) вентиляционными устройствами для отсоса воздуха из вытяжных шкафов:

- Четыре вытяжных шкафа;
- Установка по получению образцов пористого кремния с контролем *in situ*;
- Установка плазмохимического синтеза пленок и сверхрешеток на основе пленок аморфного гидрогенизированного и нитридизированного кремния,
- Установка по получению пленок двуокиси ванадия,
- Установка по получению дистиллированной воды,
- Установка по получению бидистиллированной воды,
- Участок для обработки химической посуды (водопровод, канализация),

Участок универсального вакуумного откачного поста, ВУП-5 трехфазный (380 В) потребляемая мощность 5 кВт (общая площадь 36 кв.м.).

Участок оптических исследований (общая площадь 18 кв.м):

- Эллипсометр – ЛЭФ 3М - 2 шт.

- Спектральный быстродействующий эллисометрический комплекс (Эллипс – 1000 АСГ),
- Спектрофотометр СФ-56 Ломо Спектр,
- Спектрофотометр СФ-2000,
- Спектрофотометр СФ-26 Ломо,
- ИК спектрометр Specord M80,
- Участок оптической микроскопии (Универсальный прецизионный оптометрический комплекс).

Весовая (общая площадь 12 кв.м):

- Весы ExplorerPro,
- Установка ДСК анализа Thermal Analyser DTAS 1300.

Участок электрофизических и электродинамических исследований (общая площадь 18 кв.м) с приточно-вытяжной вентиляцией с механическим побуждением:

- Высокочастотный прецизионный измеритель RLC 6500 P,
- Высокочастотный прецизионный измеритель RLC 6400 B,
- Измеритель иммитанса LCR 819.

Участок зондовой туннельной микроскопии (общая площадь 9 кв.м):

- Нанотехнологический комплекс «Умка» – 4 шт.

Дополнительно организуются экскурсии в исследовательских лабораториях ОНИ НСиБС СГУ по соглашению между ОНИ НСиБС и института физики, института химии и биологических факультетов СГУ.

Место проведения практической подготовки: учебная лаборатория микроэлектроники института физики СГУ

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» с учётом профиля подготовки «Физика и технология твердотельных электронных микро- и наноструктур».

Автор:

доцент кафедры материаловедения,
технологии и управления качеством, к.ф.-м.н Д.В. Терин

Программа разработана в 2019 г. и одобрена на заседании кафедры материаловедения, технологии и управления качеством от 23.09.2019 г., протокол № 2.

Программа актуализирована в 2021 г. и одобрена на заседании кафедры материаловедения, технологии и управления качеством от 20.09.2021 г., протокол № 2.

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендуемая литература

1. Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: учеб. пособие. - М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2011. - 240 с. (1 экз.)
2. Основы микроэлектроники: учебник / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. – 3-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008. – 383 с. (1 экз.)
3. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб.пособие/ В.И. Старосельский. – М.: Юрайт: Высш.образование, 2009. – 463 с. **Гриф УМО** (1 экз.)
4. Кремний – материал наноэлектроники: учеб. пособие / Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. – М.: Техносфера, 2007. – 351 с. **Гриф УМО** (3 экз.)
5. Основы микроэлектроники: учеб. пособ. для вузов / И. П. Степаненко. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Лаб. Базовых Знаний, 2003. – 488 с. (3 экз.)
6. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике / В.В. Денисенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 407 с. (5 экз.)
7. Функционально интегрированные элементы интегральных схем и микросистем [Электронный ресурс] / Е. А. Рындин [и др.]. - Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. - 78 с. — ЭБС «IPRbooks»
8. Гриценко В.А. Синтез, свойства и применение диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью в кремниевых приборах [Электронный ресурс]: монография/ Гриценко В.А., Елисеев А.П., Иванов М.В.— Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2011. — 158 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/15815>. — ЭБС «IPRbooks