

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:

ФИО: Исаев Игорь Магомедович

Должность: Проректор по учебной работе

Дата подписания: 16.11.2023 16:41:19

Уникальный идентификатор документа:

d7a26b9e8ca85e98ec3de2eb454b4659d061f249

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»**

## Рабочая программа дисциплины (модуля)

# Физико-технологические основы получения материалов и элементов макро-, микро- и наноэлектроники

Закреплена за подразделением

Кафедра технологии материалов электроники

Направление подготовки

00.06.00 Аспирантура

Профиль

Квалификация

**Исследователь. Преподаватель-исследователь**

Форма обучения

**очная**

Общая трудоемкость

**3 ЗЕТ**

Часов по учебному плану

108

Формы контроля в семестрах:

в том числе:

зачет 6

аудиторные занятия

68

самостоятельная работа

40

### Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	6 (3.2)		Итого	
	Неделя 20			
Вид занятий	УП	РП	УП	РП
Лекции	34	17	34	17
Практические	34	17	34	17
Итого ауд.	68	34	68	34
Контактная работа	68	34	68	34
Сам. работа	40	74	40	74
Итого	108	108	108	108

Программу составил(и):

*к.т.н., доц., Подгорная Светлана Владимировна; к.ф.-м.н., зав.каф., Костишин Владимир Григорьевич*

Рабочая программа

**Физико-технологические основы получения материалов и элементов макро-, микро- и наноэлектроники**

Разработана в соответствии с ОС ВО:

Самостоятельно устанавливаемый образовательный стандарт к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов) (приказ от 17.03.2022 г. № 2-22)

Составлена на основании учебного плана:

- 1.3.8 Физика конденсированного состояния
- 1.3.11 Физика полупроводников
- 1.4.2 Аналитическая химия
- 2.2.3 Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники
- 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы
- 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением
- 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов
- 2.6.2 Металлургия черных, цветных и редких металлов
- 2.6.3 Литейное производство
- 2.6.4 Обработка металлов давлением
- 2.6.5 Порошковая металлургия и композиционные материалы
- 2.6.6 Нанотехнологии и наноматериалы
- 2.6.9 Технология электрохимических процессов и защита от коррозии
- 2.6.12 Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ
- 2.6.17 Металловедение
- 2.8.3 Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр
- 2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика
- 2.8.7 Теоретические основы проектирования горнотехнических систем
- 2.8.8 Геотехнология, горные машины
- 2.8.9 Обогащение полезных ископаемых, АСП-22-4.plx , утвержденного Ученым советом НИТУ МИСИС в составе соответствующей ОПОП ВО 22.09.2022, протокол № 8-22

Утверждена в составе ОПОП ВО:

- 1.3.8 Физика конденсированного состояния
- 1.3.11 Физика полупроводников
- 1.4.2 Аналитическая химия
- 2.2.3 Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники
- 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы
- 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением
- 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов
- 2.6.2 Металлургия черных, цветных и редких металлов
- 2.6.3 Литейное производство
- 2.6.4 Обработка металлов давлением
- 2.6.5 Порошковая металлургия и композиционные материалы
- 2.6.6 Нанотехнологии и наноматериалы
- 2.6.9 Технология электрохимических процессов и защита от коррозии
- 2.6.12 Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ
- 2.6.17 Металловедение
- 2.8.3 Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр
- 2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика
- 2.8.7 Теоретические основы проектирования горнотехнических систем
- 2.8.8 Геотехнология, горные машины
- 2.8.9 Обогащение полезных ископаемых, , утвержденной Ученым советом НИТУ МИСИС 22.09.2022, протокол № 8-22

Рабочая программа одобрена на заседании

**Кафедра технологии материалов электроники**

Протокол от 21.06.2022 г., №11

Руководитель подразделения Диденко Сергей Иванович

### 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ

1.1	Цель дисциплины - развитие представлений в области физики современных полупроводниковых приборов, изучение современных моделей физических процессов, конструкций, требований к параметрам, конструкциям эпитаксиальных гетероструктур для создания современных приборов нано-и микроэлектроники. Освоение методов анализа, измерения параметров и вычисления параметров материала, контактов и приборных структур.
-----	--

### 2. МЕСТО В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Блок ОП:		2.1.2
<b>2.1</b>	<b>Требования к предварительной подготовке обучающегося:</b>	
2.1.1	Академическое письмо	
2.1.2	Иностранный язык	
2.1.3	История и философия науки	
<b>2.2</b>	<b>Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:</b>	
2.2.1	Аналитическая химия	
2.2.2	Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика	
2.2.3	Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика	
2.2.4	Геотехнология, горные машины	
2.2.5	Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр	
2.2.6	Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр	
2.2.7	Литейное производство	
2.2.8	Материаловедение	
2.2.9	Материаловедение	
2.2.10	Материаловедение	
2.2.11	Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов	
2.2.12	Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов	
2.2.13	Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов	
2.2.14	Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов	
2.2.15	Металлургия черных, цветных и редких металлов	
2.2.16	Металлургия черных, цветных и редких металлов	
2.2.17	Металлургия черных, цветных и редких металлов	
2.2.18	Нанотехнологии и наноматериалы	
2.2.19	Нанотехнологии и наноматериалы	
2.2.20	Нанотехнологии и наноматериалы	
2.2.21	Обогащение полезных ископаемых	
2.2.22	Обработка металлов давлением	
2.2.23	Порошковая металлургия и композиционные материалы	
2.2.24	Порошковая металлургия и композиционные материалы	
2.2.25	Теоретические основы проектирования горнотехнических систем	
2.2.26	Технологии и машины обработки давлением	
2.2.27	Технологии и машины обработки давлением	
2.2.28	Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники	
2.2.29	Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники	
2.2.30	Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники	
2.2.31	Технология электрохимических процессов и защита от коррозии	
2.2.32	Физика конденсированного состояния	
2.2.33	Физика конденсированного состояния	
2.2.34	Физика конденсированного состояния	
2.2.35	Физика конденсированного состояния	
2.2.36	Физика конденсированного состояния	
2.2.37	Физика полупроводников	
2.2.38	Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ	
2.2.39	Электротехнические комплексы и системы	



микроэлектроники
<b>А-1: Способность к научному поиску и применению результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок при самостоятельных исследованиях</b>
<b>Знать:</b>
А-1-31 Требования к параметрам современных полупроводниковых приборов и взаимосвязь между конструкцией прибора, характеристиками материала и выходными параметрами приборов
<b>А-3: Способность проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по заданной тематике и оформлять их результаты</b>
<b>Уметь:</b>
А-3-У1 Применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования приборов твердотельной электроники и микроэлектроники
<b>А-2: Способность проводить научный эксперимент и анализ его результата</b>
<b>Уметь:</b>
А-2-У1 Проводить расчеты характеристик приборов твердотельной электроники и микроэлектроники на основе новых материалов
<b>А-1: Способность к научному поиску и применению результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок при самостоятельных исследованиях</b>
<b>Уметь:</b>
А-1-У1 Самостоятельно получать новые знания из изучения современных публикаций о приборах твердотельной электроники и микроэлектроники
<b>А-3: Способность проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по заданной тематике и оформлять их результаты</b>
<b>Владеть:</b>
А-3-В1 Методологией теоретических и экспериментальных исследований в профессиональной области, соответствующей направленности образовательной программы
<b>А-2: Способность проводить научный эксперимент и анализ его результата</b>
<b>Владеть:</b>
А-2-В1 Подходами к организации экспериментальных исследований
<b>А-1: Способность к научному поиску и применению результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок при самостоятельных исследованиях</b>
<b>Владеть:</b>
А-1-В1 Программными пакетами математического моделирования и использовать их для моделирования и расчета теоретических характеристик полупроводниковых приборов

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ

Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Формируемые индикаторы компетенций	Литература и эл. ресурсы	Примечание	КМ	Выполняемые работы
	<b>Раздел 1. Контакт металл-полупроводник</b>							
1.1	Современные представления физики контактов металл-полупроводник. Теория Шокли. Модель Бардина. Тесный контакт. Модель Танга. Дефектные модели. Влияние разницы работ выхода, сил зеркального изображения, промежуточного слоя и поверхностных состояний на высоту барьера. /Лек/	6	2	А-1-31 А-1-У1 А-1-В1 А-2-31 А-2-У1 А-2-В1 А-3-31 А-3-У1 А-3-В1	Л1.5Л2.2 Л2.7			

1.2	Токоперенос в контактах металл-полупроводник. Термоэлектронная, полевая и термополевая эмиссия. Термоэмиссионно-диффузионная модель. Токовые шунты. Омический контакт. Контакт Мотта /Лек/	6	2	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5Л2.2 Л2.7				
1.3	Изучение методов обработки ВАХ и ВХФ контактов металл-полупроводник и вычисления параметров контакта и полупроводника. Подготовка к семинару. /Ср/	6	8	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5 Л2.7Л2.9				
1.4	Практическое занятие №1 "Измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик контактов металл-полупроводник. Вычисление параметров БШ из вольт-амперных характеристик и вольт-фарадных характеристик. Методы измерения и вычисления параметров ОК. TLM метод. Модифицированный TLM метод." /Пр/	6	2	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5Л2.11		КМ1		
1.5	Самостоятельное изучение современной периодической литературы в области контактов Шоттки к широкозонным полупроводникам /Ср/	6	10	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Э1 Э2				
1.6	Подготовка к контрольной работа №1 "Контакт-металл полупроводник. Барьер Шоттки" /Ср/	6	9	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5Л2.2 Л2.7 Л2.11				
<b>Раздел 2. P-i-n диоды</b>									
2.1	Распределение поля и потенциала в p-i-n структуре. Расчет вольт-амперной характеристики. Емкость и частотные характеристики p-i-n диодов. /Лек/	6	2	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5Л2.11				
2.2	Практическое занятие №2 "Методы измерения вольт-фарадной характеристики p <sup>+</sup> -n-n <sup>+</sup> диодов. Расчет и моделирование реальной ВФХ." /Пр/	6	2	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5Л2.7				
2.3	Обзор современной периодической литературы в области конструкций p-i-n диодов различного назначения на перспективных полупроводниковых материалах. /Ср/	6	8	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Э1 Э2				
<b>Раздел 3. Гетеропереходы</b>									

3.1	Неизотипный гетеропереход. Модель Андерсона. Механизмы токопереноса. /Лек/	6	2	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.5 Л1.1 Л2.9 Л1.1				
3.2	Анизотипный гетеропереход. Двумерный электронный газ. Слойная концентрация электронов в двумерном электронном газе. Управление концентрацией в ДЭГ напряжением на затворе. /Лек/	6	2	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.5 Л1.1 Л2.9 Л1.1Л2.10				
3.3	Практическое занятие №3 "Методы расчета гетеропереходов. Построение зонных диаграмм" /Пр/	6	2	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.1 Л2.9 Л1.1Л2.3 Л2.10		КМ1		
3.4	Написание реферата по теме "Приборы и материалы современной гетероструктурной электроники" /Ср/	6	10	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.1 Л2.10Л1.1 Э1 Э2				
3.5	Подготовка к контрольной работе № 2 "Расчет характеристик гетеропереходов" /Ср/	6	5	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.1 Л2.10Л2.5 Л2.6				
<b>Раздел 4. Современные гетероструктурные транзисторы</b>									
4.1	Гетеробиполярные транзисторы на основе AlGaAs/GaAs и Si/SiGe. Методы повышения частотных характеристик биполярных транзисторов. Критерии оптимизации конструкции и выбора полупроводникового материала. /Лек/	6	1	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.5 Л2.10Л2.6 Л1.1				
4.2	Практическое занятие №4 "Расчет параметров гетеробиполярных транзисторов" /Пр/	6	2	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.1 Л2.10Л2.3 Л2.6				
4.3	Полевые транзисторы на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, AlGaN/GaN и AlGaO/Ga2O3. Методы повышения частотных характеристик. Критерии оптимизации конструкции и выбора полупроводникового материала. /Лек/	6	1	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.1 Л2.10Л2.5				
4.4	Практическое занятие №5 "Расчет параметров селективно-легированных транзисторов" /Пр/	6	2	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.1 Л2.9 Л2.10Л2.5				



4.5	Выполнение домашней работы №1 "Расчет характеристик и проектирование гетеробиполярного транзистора на основе GaAs" /Ср/	6	8	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5 Л1.1 Л2.9 Л2.10Л2.6			
4.6	Выполнение домашней работы №2 "Расчет характеристик и проектирование селективно легированного гетеротранзистора на основе GaAs" /Ср/	6	8	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5 Л1.1 Л2.9 Л2.10Л2.5			
<b>Раздел 5. Приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением</b>								
5.1	Самостоятельное изучение современной периодической литературы в области приборов СВЧ, логической и наноэлектроники, основанных на резонансном туннелировании. Обзор современных материалов и гетероструктур. Подготовка к лекционному занятию. /Ср/	6	4	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Э1 Э2			
5.2	Приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением на статической ВАХ. Туннельный диод. Резонансно-туннельный диод на основе гетероструктуры с двойным барьером. Физические принципы работы. Механизмы токопереноса. Конструкции, перспективные материалы. /Лек/	6	1	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.4 Л1.5Л2.12			
5.3	Практическое занятие №6 "Подход к расчету коэффициента прозрачности двухбарьерной структуры. Расчет тока через РТД" /Пр/	6	2	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.4Л2.3 Л2.4			
5.4	Приборы на основе междолинного переноса электронов. Диод Ганна. Физические принципы работы. Режимы работы. Конструкции. Требования к материалам. /Лек/	6	1	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.1 Л1.2 Л1.5			
5.5	Практическое занятие №7 "Расчет тока генератора Ганна для различных режимов работы. Критерий устойчивого доменного режима." /Пр/	6	2	A-1-31 A-1-У1 A-1-В1 A-2-31 A-2-У1 A-2-В1 A-3-31 A-3-У1 A-3-В1	Л1.5			

5.6	Лавинно-пролетные диоды. Материалы, конструкции. Лавинно-пролетные диоды на гетероструктурах. Рабочие режимы. /Лек/	6	1	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.5Л2.1			
5.7	Практическое занятие №8 "Подход к расчету параметров лавинно пролетных диодов" /Пр/	6	2	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.5Л2.1			
<b>Раздел 6. Современные приборы силовой электроники</b>								
6.1	Высоковольтные диоды на основе гетероструктур. Конструкции и материалы. Силовые НЕМТ на основе гетероструктур AlGaN/GaN. Конструкция, технологическая схема изготовления, характеристики. /Лек/	6	1	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.3 Л1.5			
6.2	Конструкции современных кремниевых силовых приборов. SiC силовая электроника /Лек/	6	1	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.3 Л1.5			
6.3	Самостоятельное изучение конструкций современных силовых приборов и перспективных материалов. Подготовка к семинару. /Ср/	6	4	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Э1 Э2			
6.4	Практическое занятие №9 "Обзор конструкций силовых диодов на GaN, SiC и алмазе. Расчет основных характеристик" /Пр/	6	1	A-1-31 A-1-Y1 A-1-B1 A-2-31 A-2-Y1 A-2-B1 A-3-31 A-3-Y1 A-3-B1	Л1.3 Л1.5		КМ1	

### 5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### 5.1. Контрольные мероприятия (контрольная работа, тест, коллоквиум, экзамен и т.п), вопросы для самостоятельной подготовки

Код КМ	Контрольное мероприятие	Проверяемые индикаторы компетенций	Вопросы для подготовки
КМ1	Вопросы для подготовки к практическим занятиям.	A-3-Y1;A-3-31;A-2-31;A-1-31;A-1-Y1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Контакт металл-полупроводник. Сравнение модели Шокли и Бардина. Поверхностные состояния, их влияние на высоту барьера.</li> <li>2. Контакт металл-полупроводник. Модели тесного контакта.</li> <li>3. Контакт металл-полупроводник. Дефектные модели. Модель Танга.</li> <li>4. Токоперенос через контакт металл-полупроводник. Термоэлектронная, полевая и термополевая эмиссия.</li> <li>5. Токоперенос через контакт металл-полупроводник. Термоэмиссионно-диффузионная модель.</li> <li>6. Омический контакт. Механизмы токопереноса. Токовые шунты. Выражение для контактного сопротивления для разных механизмов. Вывод.</li> <li>7. Контакт Мотта. Вольт-амперная характеристика. Вывод выражения.</li> <li>8. Применение диодов Шоттки, принцип действия. Преимущества и недостатки в сравнении с диодами с p-n переходом.</li> <li>9. Эквивалентная схема диода с барьером Шоттки. Частотные характеристики.</li> <li>10. P-i-n и n-i-p структуры. Распределение поля и потенциала. Вольт-фарадные характеристики.</li> </ol>

		<p>11. P-i-n и n-i-p структуры. Вольт-амперные характеристики. Вывод выражения. Полная комплексная проводимость.</p> <p>12. Гетеропереходы. Изотипный и анизотипный гетеропереходы. Резкий и плавный гетеропереход.</p> <p>13. Гетеропереход. Модель Андерсона. Основные соотношения для расчета поля, потенциала и барьерной емкости гетероперехода.</p> <p>14. Двумерный электронный газ на границе гетероперехода. Условия образования.</p> <p>15. Зависимость слоевой концентрации в 2DEG от положения уровня Ферми. Управление слоевой концентрацией в 2DEG напряжением на затворе.</p> <p>16. Подвижность электронов в 2DEG. Механизмы рассеяния.</p> <p>17. Вольт-фарадные характеристики барьера Шоттки к гетероструктуре с 2DEG.</p> <p>18. Анизотипный p-n гетеропереход. Коэффициент инжекции.</p> <p>19. Анизотипный p-n гетеропереход. Механизмы переноса. Термоэлектронно-диффузионная модель.</p> <p>20. Анизотипный p-n гетеропереход. Механизмы переноса. Термоэлектронно-диффузионно-полевая модель.</p> <p>21. Типичная конструкция ГБТ на GaAs и SiGe, технологические приемы их изготовления, эквивалентная схема и рабочий диапазон.</p> <p>22. Основные токи, протекающие через структуру ГБТ.</p> <p>23. Частотные характеристики ГБТ и методы повышения частотного диапазона. Перспективные материалы.</p> <p>24. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs и AlGaN/GaN. Двумерный электронный газ. Назначение отдельных слоев HEMT.</p> <p>25. Вольт-амперные характеристики полевого транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT), факторы, определяющие ток стока и крутизну.</p> <p>26. Необходимость применения различных полупроводниковых соединений в гетеропарах для HBT и HEMT.</p> <p>27. Приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением на статической ВАХ. Принцип генерации сигнала.</p> <p>28. Туннельные диоды, физические эффекты, приводящие к наличию ОДС на статической ВАХ. Эквивалентная схема.</p> <p>29. Резонансно-туннельный диод. Принцип работы. Физические эффекты, приводящие к наличию ОДС на статической ВАХ. Эквивалентная схема.</p> <p>30. Резонансно-туннельный диод. Модели токопереноса через двухбарьерную гетероструктуру.</p> <p>31. Приборы работающие на эффекте междолинного перехода электронов, требования к полупроводниковым материалам.</p> <p>32. Условия получения избыточной концентрации и основные режимы работы Ганна.. Основные особенности каждого режима.</p> <p>33. Сравнение режимов работы диода Ганна: накопления избыточного заряда и доменного.</p> <p>34. Режим ограничения накопления носителей заряда (ОНОЗ). Причины применения указанного режима.</p> <p>35. Приборы, обладающие отрицательным дифференциальным в динамическом режиме. Принцип генерации сигнала.</p> <p>36. Лавинно-пролетные диоды. Возможные конструкции и принцип действия. Основные уравнения, описывающие работу ЛПД.</p> <p>37. Выбор материала для базовой области ЛПД. ЛПД на гетероструктурах.</p> <p>38. Силовые диоды на основе гетероструктур с высокой подвижностью электронов.</p> <p>39. Кремниевые силовые транзисторы. Современное состояние. Конструкции и технологии.</p> <p>40. Приборы силовой электроники на основе SiC и алмаза. Современное состояние. Конструкции и технологии.</p> <p>41. Принципы измерения ВАХ диодов. Режимы.</p> <p>42. Принципы измерения ВФХ диодов и МДП структур. Методы, режимы измерения.</p> <p>43. Измерение входных и выходных ВАХ биполярных и полевых транзисторов. Вычисление коэффициентов усиления и крутизны. Проходные ВАХ.</p> <p>44. Методы измерения граничной частоты транзистора.</p>
--	--	--

			45. Методы измерения параметров четырехполосника. 46. Методы измерения параметров омических контактов и барьеров Шоттки.
КМ2	Контрольная работа №1 "Контакт-металл полупроводник. Барьер Шоттки"	A-3-31;A-3-У1;A-2-31;A-2-У1;A-1-31;A-1-В1	<p>Вариант 1 Для контактов металл-полупроводник (кремний, арсенид галлия и нитрид галлия), оценить применимость диффузной теории выпрямления, если принять, что концентрация носителей заряда <math>10^{14} \text{ см}^{-3}</math>. Температура 300 К. Принять, что высота барьера определяется только разностью работ выхода.</p> <p>Вариант 2 Какой из механизмов протекания тока является определяющим для контакта Au-GaAs n-типа с концентрацией доноров <math>3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}</math>. Как изменится механизм при понижении температуры от 300 К до 77 К?</p> <p>Вариант 3 Считая, что для фосфида галлия n-типа высота потенциального барьера контакта металл-проводник слабо зависит от выбора металла и определяется соотношением <math>\Phi_b = 0.27\Phi_{\text{Me}} - 0.01 \text{ эВ}</math> рассчитать значение тока термополевой эмиссии и контактного сопротивления при прямом и обратном смещении 0,5 В. Понижение потенциального барьера за счёт сил зеркального изображения пренебречь. Рассмотреть металлические контакты Pt (<math>\Phi_{\text{Me}}=5.7\text{эВ}</math>), Au (<math>\Phi_{\text{Me}}=5.1\text{эВ}</math>), W (<math>\Phi_{\text{Me}}=4.5\text{эВ}</math>).</p> <p>Вариант 4 Рассчитать величину потенциального барьера <math>\Phi_b</math> для контакта кремний n-типа /алюминий, предполагая, что при образовании контакта на поверхности кремния сформировалась плёнка двуокси кремния толщиной 20 Å. Концентрация поверхностных состояний <math>N_{\text{ss}} = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}</math> средство к электрону в кремнии 4,75 эВ, работа выхода в вакуум для алюминия 4,25 эВ. Как изменится потенциальный барьер, если концентрация поверхностных состояний возрастает до <math>5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}</math>, если толщина диэлектрической плёнки уменьшится до 10 Å?</p> <p>Вариант 5 Рассчитать вероятность туннелирования для контакта золото-кремний n-типа с концентрацией доноров <math>2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}</math> при смещении 0,25 В. Как изменится вероятность туннелирования и удельное переходное сопротивление контакта при нулевом смещении, если концентрация доноров увеличится на порядок; на два порядка. Оценить контактное сопротивление.</p>

КМЗ	Контрольная работа № 2 "Расчет характеристик гетеропереходов"	А-3-У1;А-3-В1;А-2-31;А-2-У1;А-1-У1;А-2-В1	<p>задача 1:</p> <p>Вариант 1. Рассчитать и построить зонную диаграмму гетероперехода со следующими параметрами:  Эмиттер - n Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As x=0,25, легирование кремнием <math>3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}</math>, толщина 250 А;  База - p-GaAs, легированный бериллием до <math>5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}</math>.  Вычислить прямой ток при смещении 0,5 эВ.</p> <p>Вариант 2. Рассчитать и построить зонную диаграмму гетероперехода со следующими параметрами:  Эмиттер - n Si, легирование фосфором <math>9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}</math>, толщина 500 А;  База - Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> x=0,5, легированный бором до <math>9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}</math>.  Вычислить прямой ток при смещении 0,3 эВ.</p> <p>Вариант 3. Рассчитать и построить зонную диаграмму гетероперехода со следующими параметрами:  Эмиттер - n-In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As x=0,20, легирование кремнием <math>5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}</math>, толщина 250 А;  База - p-In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As x=0,35, легированный бериллием до <math>1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}</math>.  Вычислить прямой ток при смещении 0,3 эВ.</p> <p>задача 2</p> <p>Вариант 1. Рассчитать и построить зонную диаграмму селективно легированного транзистора с параметрами:  Барьерный слой - n Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As x=0,27, легирование кремнием <math>1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}</math>, толщина 500 А;  Буферный слой - n-GaAs, нелегированный (фоновую концентрацию донорной примеси принять <math>1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}</math>).</p> <p>Вариант 2. Рассчитать слоевую концентрацию в ДЭГ, напряжение отсечки для селективно легированного транзистора с параметрами:  Барьерный слой - n Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As x=0,27, легирование кремнием <math>2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}</math>, толщина 250 А;  Буферный слой - n-GaAs, нелегированный (фоновую концентрацию донорной примеси принять <math>1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}</math>).</p> <p>Вариант 3. Рассчитать слоевую концентрацию в ДЭГ для селективно легированного транзистора с параметрами:  Барьерный слой - n Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As x=0,29, легирование кремнием <math>1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}</math>, толщина 300 А;  Буферный слой - n-GaAs, нелегированный (фоновую концентрацию донорной примеси принять <math>1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}</math>).  Напряжение затвор-подложка принять равным - 1.5 В.</p>
<b>5.2. Перечень работ, выполняемых по дисциплине (Курсовая работа, Курсовой проект, РГР, Реферат, ЛР, ПР и т.п.)</b>			
Код работы	Название работы	Проверяемые индикаторы компетенций	Содержание работы

P1	Реферат по теме "Приборы и материалы современной гетероструктурной электроники"	А-3-31;А-3-В1;А-2-У1;А-1-31;А-1-В1;А-1-У1	<p>Отчетность включает реферат (doc) и презентацию, а также устный доклад.</p> <p>Темы на выбор:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Современные гетеробиполярные транзисторы на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs и Si/SiGe.</li> <li>2. Гетероструктурные транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе соединений АШВВ.</li> <li>3. Конструкции, материалы и технологии создания квантовых приборов СВЧ диапазона.</li> <li>4. Приборы с резонансным туннелированием. Современное состояние.</li> <li>5. Гетероструктурная силовая электроника.</li> <li>6. Силовые диоды на основе гетероструктур AlGaN/GaN.</li> <li>7. Приборы микроэлектроники на основе Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и его широкозонных соединений.</li> <li>8. Особенности технологии и конструкции приборов на основе твердых растворов SiGe.</li> <li>9. Солнечные батареи на основе гетероструктур АШВВ.</li> <li>10. Светодиоды и лазеры на основе гетероструктур АШВВ.</li> <li>11. Конструкции и технологии создания фотоприемников на основе гетероструктур АШВВ.</li> </ol> <p>Примерный план реферата:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Современное состояние, уровень развития и существующие проблемы в предметной области</li> <li>2. Физические основы работы выбранного прибора</li> <li>3. Конструкции, параметры и способы их повышения</li> <li>4. Требования к материалу. Критерий выбора материала.</li> <li>5. Методы и технологии получения материалов. Проблемы.</li> <li>6. Достигнутый уровень в предметной области. Привести достигнутые параметры приборов. Сравнить несколько материалов.</li> <li>7. Перспективы.</li> </ol>
P2	Задание на домашнюю работу №1 "Расчет характеристик и проектирование гетеробиполярного транзистора на основе GaAs"	А-3-У1;А-3-В1;А-2-31;А-1-31;А-1-В1;А-2-В1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Расчет параметров гетероэмиттера AlGaAs/GaAs</li> <li>2. Численный расчет поля и потенциала. Построение зонной диаграммы ГТ</li> <li>3. Численный расчет токов, протекающих в транзисторе</li> <li>4. Расчет статических коэффициентов</li> <li>5. Расчет коэффициентов передачи в схеме с ОБ и ОЭ</li> <li>6. Построение частотных характеристик. Расчет предельных, граничной частоты и частоты генерации.</li> <li>7. Построение малосигнальной эквивалентной схемы.</li> <li>8. Определение основных параметров гетероструктуры и конструкции транзистора.</li> <li>9. Разработка технологического маршрута создания транзистора.</li> <li>10. Разработка комплекта шаблонов.</li> </ol> <p>Домашние работы выполняются коллективом 2-3 человека. Каждый аспирант отвечает за определенный блок работ в рамках совместного проекта.</p>

Р3	Задание на домашнюю работу №2 "Расчет характеристик и проектирование селективно легированного гетеротранзистора на основе GaAs"	А-3-У1;А-3-В1;А-2-31;А-2-У1;А-1-31;А-1-В1;А-2-В1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Расчет энергетической диаграммы на границе n-AlGaAs/GaAs</li> <li>2. Численный расчет слоевой концентрации электронов в ДЭГ</li> <li>3. Численное моделирование вольт-фарадных характеристик затвора.</li> <li>4. Моделирование вольт-амперных характеристик стока-исток. Построение выходных ВАХ.</li> <li>5. Расчет крутизны вольт-амперной характеристики.</li> <li>6. Расчет емкостей сток-затвор и затвор-сток</li> <li>7. Расчет граничной частоты.</li> <li>8. Построение малосигнальной эквивалентной схемы.</li> <li>9. Определение основных параметров гетероструктуры и конструкции транзистора.</li> <li>10. Разработка технологического маршрута создания транзистора.</li> <li>11. Разработка комплекта шаблонов.</li> </ol> <p>Домашние работы выполняются коллективом 2-3 человека. Каждый аспирант отвечает за определенный блок работ в рамках совместного проекта.</p>
----	---	--	---

### 5.3. Оценочные материалы, используемые для экзамена (описание билетов, тестов и т.п.)

Экзамен по дисциплине не предусмотрен.

### 5.4. Методика оценки освоения дисциплины (модуля, практики. НИР)

По дисциплине предполагается следующая шкала оценок:

а) «отлично» – аспирант показывает глубокие, исчерпывающие знания в объеме пройденной программы, уверенно действует по применению полученных знаний на практике, грамотно и логически стройно излагает материал при ответе, умеет формулировать выводы из изложенного теоретического материала, знает дополнительно рекомендованную литературу;

б) «хорошо» – аспирант показывает твердые и достаточно полные знания в объеме пройденной программы, допускает незначительные ошибки при освещении заданных вопросов, правильно действует по применению знаний на практике, четко излагает материал;

в) «удовлетворительно» – аспирант показывает знания в объеме пройденной программы, ответы излагает хотя и с ошибками, но уверенно исправляемыми после дополнительных и наводящих вопросов, правильно действует по применению знаний на практике;

г) «неудовлетворительно» – аспирант допускает грубые ошибки в ответе, не понимает сущности излагаемого вопроса.

Зачет выставляется по итогу выполнения всех контрольных мероприятий на оценку "удовлетворительно" и выше.

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

### 6.1. Рекомендуемая литература

#### 6.1.1. Основная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л1.1	Куц Г. Г., Соколова Ж. М., Шангина Л. И.	Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов: учебное пособие	Электронная библиотека	Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012
Л1.2	Соколова Ж. М.	Приборы и устройства СВЧ, КВЧ и ГВЧ диапазонов: учебное пособие	Электронная библиотека	Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012
Л1.3	Белоус А. И., Ефименко С. А., Турцевич А. С.	Полупроводниковая силовая электроника	Электронная библиотека	Москва: Техносфера, 2013
Л1.4	Борисенко В. Е.	Нанoeлектроника: теория и практика: учебник	Электронная библиотека	Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015
Л1.5	Зи С. М., Трутко А. Ф.	Физика полупроводниковых приборов: пер. с англ.	Библиотека МИСиС	М.: Энергия, 1973

#### 6.1.2. Дополнительная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
--	---------------------	----------	------------	-------------------

	Авторы, составители	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л2.1	Троян П. Е., Сахаров Ю. В.	Нанoeлектроника: учебное пособие	Электронная библиотека	Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010
Л2.2	Ханефт А. В.	Ионные и электронные процессы и контактные явления в широкозонных полупроводниках: электронное учебное пособие: учебное пособие	Электронная библиотека	Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2014
Л2.3	Ашкрофт Н., Мермин Н.	Физика твердого тела	Электронная библиотека	Москва: Мир, 1979
Л2.4	Зейтц Ф.	Современная теория твердого тела	Электронная библиотека	Москва, Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949
Л2.5	Кольцов Геннадий Иосифович	СВЧ-приборы и интегральные микросхемы: Разд.: Расчет параметров селективно легированного гетеротранзистора: учеб. пособие для студ. спец. 200.200	Библиотека МИСиС	М.: Учеба, 1998
Л2.6	Кольцов Геннадий Иосифович	СВЧ-приборы и интегральные микросхемы: Разд.: Гетеробиполярные СВЧ-транзисторы: учеб. пособие для студ. спец. 200.200	Библиотека МИСиС	М.: Учеба, 1998
Л2.7	Ковалев Алексей Николаевич, Фоломин Павел Иванович	Твердотельная электроника: Разд.: Контактные явления: Учеб. пособие	Библиотека МИСиС	М.: Учеба, 1997
Л2.8	Ковалев Алексей Николаевич	Гетероструктурная нанoeлектроника: учеб. пособие	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МИСиС, 2009
Л2.9	Ковалев Алексей Николаевич	Твердотельная электроника: учеб. пособие	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МИСиС, 2010
Л2.10	Ковалев А. Н.	Транзисторы на основе полупроводниковых гетероструктур: монография	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МИСиС, 2011
Л2.11	Кольцов Геннадий Иосифович, Диденко Сергей Иванович, Орлова Марина Николаевна	Физика полупроводниковых приборов. Расчет параметров биполярных приборов: сб. задач	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МИСиС, 2012
Л2.12	Орлова Марина Николаевна, Борзых Ирина Вячеславовна	Нанoeлектроника: курс лекций	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МИСиС, 2013
Л2.13	Ковалев А. Н., Рабинович О. И., Тимошина М. И.	Физика и технология наноструктурных гетерокомпозиций: учебник	Электронная библиотека	М.: Изд-во МИСиС, 2015
<b>6.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»</b>				
Э1	eLIBRARY.RU - НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА	<a href="https://elibrary.ru/defaultx.asp?">https://elibrary.ru/defaultx.asp?</a>		



Э2	«Scopus» — библиографическая и реферативная база данных	<a href="https://www.scopus.com/">https://www.scopus.com/</a>
<b>6.3 Перечень программного обеспечения</b>		
П.1	Autodesk AutoCAD	
П.2	Microsoft Office	
П.3	LMS Canvas	
П.4	MS Teams	
П.5	MATLAB	
П.6	MATCAD	
П.7	AutoCAD	
П.8	CorelDRAW Graphics Suite X4	
<b>6.4. Перечень информационных справочных систем и профессиональных баз данных</b>		
И.1	Научные журналы и статьи	
И.2	<a href="http://elibrary.ru/">http://elibrary.ru/</a>	
И.3	<a href="https://link.springer.com/">https://link.springer.com/</a>	
И.4	Web of Science <a href="https://apps.webofknowledge.com">https://apps.webofknowledge.com</a>	
И.5	Scopus <a href="https://www.scopus.com/">https://www.scopus.com/</a>	
И.6	Elsevier <a href="https://www.sciencedirect.com/">https://www.sciencedirect.com/</a>	
И.7		
И.8	Электронная библиотека МИСиС	
И.9	<a href="http://elibrary.misis.ru/">http://elibrary.misis.ru/</a>	
И.10	Электронная библиотека издательство "Лань"	
И.11	<a href="https://e.lanbook.co">https://e.lanbook.co</a>	
И.12		
И.13	Единое окно доступа к образовательным ресурсам	
И.14	<a href="https://window.edu.ru">https://window.edu.ru</a>	

### 7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Ауд.	Назначение	Оснащение
Любой корпус Мультимедийная	Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа и/или для проведения практических занятий:	комплект учебной мебели до 36 мест для обучающихся, мультимедийное оборудование, магнитно-маркерная доска, рабочее место преподавателя, ПК с доступом к ИТС «Интернет», ЭИОС университета через личный кабинет на платформе LMS Canvas, лицензионные программы MS Office, MS Teams, ESET Antivirus
Читальный зал электронных ресурсов		комплект учебной мебели на 55 мест для обучающихся, 50 ПК с доступом к ИТС «Интернет», ЭИОС университета через личный кабинет на платформе LMS Canvas, лицензионные программы MS Office, MS Teams, ESET Antivirus.
Любой корпус Компьютерный класс	Учебная аудитория для проведения практических занятий:	экран, проектор, доска, комплект учебной мебели на 30 посадочных мест, персональные компьютеры, доступ к ЭИОС университета LMS Canvas, лицензионные программы MS Teams, MS Office

### 8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Дополнительная литература

1. Данилов В.С. Микроэлектроника СВЧ. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2007.
2. Шухостанов А.К. Лавинно-пролетные диоды. Физика, технология, применение. Москва. Издательство «Радио и связь», 1997, стр 208
3. S. M. Sze, Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007
4. Rüdiger Quay. Gallium Nitride Electronics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008
- Переводная версия: Р. Куэй. Электроника на основе нитрида галлия. Москва. «Техносфера», 2011,
5. Sigfrid Yngvesson. Microwave Semiconductor Devices. Springer, Boston, MA. 1991.
6. Федоров Н.Д. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника. - М.: Радио и связь, 1998.
7. Шур М.С. Современные приборы на основе арсенида галлия. - М.: Мир, 1991.
8. Шур М. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Мир, 1992. — 479 с.

9. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. - Вильнюс: МОКСЛАС, 1989.
10. Кольцов Г.И., Горюнов Н.Н., Юрчук С.Ю. СВЧ-приборы и интегральные микросхемы. Лабораторный практикум. - М.: МИСиС, 1995.
11. Тагер, А.С.; Вальд-Перлов, В.М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. Москва. «Советское радио», 1968, 480 стр
12. Левинштейн М. Е., Пожела Ю. К., Шур М. С. Эффект Ганна. Москва, «Советское радио», 1975, 288 с.
13. Иванов С.Н., Пенин Н.А., Скворцова Н.Е., Соколов Ю.Ф. Физические основы работы полупроводниковых СВЧ диодов. М.: Советское радио, 1965. — 191 с
14. Дзехцер, Г.Б.; Орлов, О.С. P-I-N диоды в широкополосных устройствах СВЧ. Издательство: М.: Советское радио, 200 страниц; 1970 г.
15. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах М.: Радио и связь, 1987. — 119 с.
16. Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алехин Ю.Н. и др. Микроэлектронные устройства СВЧ. Учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов. — М.: Высшая школа, 1988. — 280 с.

Рекомендуемую литературу можно получить в библиотеке МИСиС, в бумажном и электронном виде на кафедре.