

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета РТЭ Небольсин В.А.
«27» марта 2024 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины
«Физические основы СВЧ-электроники»

Направление подготовки 16.03.01 Техническая физика

Профиль Физическая электроника

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2024

Автор программы

Бормонтов А.Е.

Заведующий кафедрой
Твердотельной электроники

Небольсин В.А.

Руководитель ОПОП

Янченко Л.И.

Воронеж 2024

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины формирование представлений о принципах, основах работы и технологических процессах изготовления приборов СВЧ диапазона, получение навыков практического применения приборов и устройств этого диапазона частот.

1.2. Задачи освоения дисциплины

- получение представлений о физических идеях и принципах современной СВЧ электроники;
- формирование знаний по вопросам теории и практики использования приборов и устройств СВЧ диапазона;
- изучение физических процессов в приборах и устройствах СВЧ диапазона, знакомство с технологическими процессами их изготовления;
- приобретение навыков владения методами и средствами анализа процессов в приборах СВЧ электроники;
- изучение конструктивно-технологических особенностей, параметров, характеристик и режимов работы приборов и устройств СВЧ диапазона.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Физические основы СВЧ-электроники» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений блока Б1.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Физические основы СВЧ-электроники» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-6 - Способность осуществлять разработку и контроль технологических процессов изготовления материалов, узлов и устройств микроэлектроники и квантовой электроники на базе нанотехнологий

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-6	знать основные технические параметры и характеристики микроволновых приборов; основные технологические процессы изготовления и принципы работы устройств, использующих приборы микроволнового диапазона
	уметь использовать методы и средства анализа и контроля технологических процессов изготовления и физических процессов в микроволновых приборах, строить простейшие физические модели этих приборов
	владеть навыками анализа физических процессов в приборах СВЧ диапазона; навыками расчета параметров и характеристик микроволновых приборов и устройств на их основе.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Физические основы СВЧ-электроники» составляет 3 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий
очная форма обучения

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		7
Аудиторные занятия (всего)	54	54
В том числе:		
Лекции	36	36
Практические занятия (ПЗ)	18	18
Самостоятельная работа	54	54
Виды промежуточной аттестации - зачет	+	+
Общая трудоемкость: академические часы	108	108
зач.ед.	3	3

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	СРС	Всего, час
1	Основы физических процессов в СВЧ приборах	Особенности СВЧ диапазона и классификация СВЧ приборов. Параметры микроволновых приборов. Основные теоретические соотношения, определяющие физические процессы и характеристики этих приборов. Физические и математические модели.	4	2	8	14
2	Свойства р-п перехода и барьера Шоттки в СВЧ диапазоне	Диод на переменном токе. Барьерная и диффузионная емкости. Эффект накопления заряда. Диоды с накоплением заряда. Принцип действия, параметры и характеристики полупроводниковых диодов с р-п переходом и барьером Шоттки. Переходные процессы в диодах. Эквивалентные схемы. Технологические и конструктивные особенности диодов СВЧ диапазона.	6	4	8	18
3	Полупроводниковые СВЧ диоды	Детекторы. Смесители. Р-и-п диоды. Принцип действия, параметры и характеристики. Варакторные диоды. Основные параметры и характеристики. Применение диодов с нелинейной емкостью. Туннельные диоды. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) туннельного диода. Избыточный ток. Выбор материалов для туннельных диодов. Обращенные диоды. Диоды Ганна. Требования к зонной структуре полупроводников. Статическая ВАХ. Зарядовые неустойчивости в приборах с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). Генерация СВЧ колебаний в диодах Ганна. Основные режимы работы. Лавинно-пролетные диоды (ЛПД). Лавинное умножение носителей. Устройство и зонная диаграмма ЛПД. Малосигнальные характеристики. Применение для генерации СВЧ колебаний. Инжекционно-пролетные диоды. Принцип действия, параметры и характеристики.	12	6	14	32

4	Гетероструктурные СВЧ приборы	Эффект резонансного туннелирования в двухбарьерной гетероструктуре и в многобарьерных структурах. ВАХ двух-и многобарьерных структур. Приборы на основе резонансного туннелирования.	4	2	6	12
5	Биполярные и полевые СВЧ транзисторы	Биполярные транзисторы (БТ) СВЧ. Устройство и принцип действия. Параметры и характеристики. Гетероструктурный БТ. Полевые транзисторы (ПТ). ПТ с управляющим p-n переходом и барьером Шоттки. ПТ с изолированным затвором (МОП транзистор). Устройство, принцип действия, частотные и шумовые свойства. Гетероструктурный ПТ (НЕМТ). Мощные и высоковольтные МОП транзисторы.	8	4	14	26
6	СВЧ приборы при экстремальных температурах	Полупроводниковые материалы для высокотемпературной электроники. Твердотельные приборы на карбиде кремния и нитриде галлия.	2	0	4	6
Итого			36	18	54	108

5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-6	знать основные технические параметры и характеристики микроволновых приборов; основные технологические процессы изготовления и принципы работы устройств, использующих приборы микроволнового диапазона	Активная работа на практических занятиях	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

	уметь использовать методы и средства анализа и контроля технологических процессов изготовления и физических процессов в микроволновых приборах, строить простейшие физические модели этих приборов	Решение стандартных задач на практических занятиях Умение обрабатывать экспериментальные данные в рамках существующих моделей прибора	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть навыками анализа физических процессов в приборах СВЧ диапазона; навыками расчета параметров и характеристик микроволновых приборов и устройств на их основе.	Решение прикладных задач на практических занятиях	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 7 семестре для очной формы обучения по двухбалльной системе:

«зачтено»

«не зачтено»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ПК-6	знать основные технические параметры и характеристики микроволновых приборов; основные технологические процессы изготовления и принципы работы устройств, использующих приборы микроволнового диапазона	Тест	Выполнение теста на 70-100%	Выполнение менее 70%
	уметь использовать методы и средства анализа и контроля технологических процессов	Решение стандартных практических задач	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

изготовления и физических процессов в микроволновых приборах, строить простейшие физические модели этих приборов			
владеть навыками анализа физических процессов в приборах СВЧ диапазона; навыками расчета параметров и характеристик микроволновых приборов и устройств на их основе.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1.	К диапазону СВЧ обычно относят область ... а) от 1 МГц до 1 ГГц; б) от 30 МГц до 30 ГГц ; в) от 300 МГц до 300 ГГц; г) от 1 ГГц до 1 ТГц. Правильный ответ: в).
2.	Емкость р-п перехода при увеличении обратного напряжения ... а) увеличивается; б) уменьшается; в) имеет максимум; г) не изменяется. Правильный ответ: б).
3.	Диод Шоттки обладает выпрямительными свойствами в режиме ... а) обогащения; б) плоских зон; в) обеднения; г) инверсии. Правильный ответ: в).
4.	Быстродействие диодов Шоттки ограничено ... а) временем максвелловской (диэлектрической) релаксации; б) временем жизни неосновных носителей; в) временем жизни электронно-дырочных пар; г) конструкцией диодов. Правильный ответ: а) и г).
5.	Для изготовления структур лавинно-пролетных диодов используют, в основном, полупроводниковые материалы... а) GaAs; б) AlGaAs / GaAs;

	в) InGaAs / InP; г) Si. Правильный ответ: а) и г).
6.	Отрицательная динамическая проводимость лавинно-пролетного диода возникает (наблюдается) в ... а) статическом режиме; б) квазистатическом режиме; в) электростатическом режиме; г) динамическом режиме. Правильный ответ: г).
7.	Квантовые эффекты в туннельном диоде наблюдаются ... а) при обратном смещении; б) при небольшом прямом смещении; в) на участке ВАХ с ОДС; г) при большом прямом смещении. Правильный ответ: а) и б).
8.	Эффект Ганна наблюдается в полупроводниках GaAs, InP с электропроводностью... а) собственной; б) донорной; в) акцепторной; г) компенсированной. Правильный ответ: б).
9.	Возможность использования низкочастотных транзисторов в СВЧ диапазоне ограничена следующими физическими факторами... а) временем переноса носителей заряда; б) углом вылета носителей заряда из области базы; в) скоростью изменения накопленного заряда; г) схемой включения и соответствующими ей паразитными емкостями и индуктивностями. Правильный ответ: а), в) и г).
10.	В линейном режиме максимальная частота работы МОП-транзистора от длины канала L зависит... а) пропорционально L; б) обратно пропорционально L; в) обратно пропорционально L^2; г) не зависит от L. Правильный ответ: в).
11.	В лавинно-пролетном диоде со структурой $p^+-n-i-p^+$ максимальная напряженность электрического поля имеет место в области а) p^+-n перехода; б) n - слоя; в) i - слоя; г) $i-p^+$ перехода. Правильный ответ: а).
12.	Диодами, в работе которых используются только основные носители, являются ... а) диоды с барьером Шоттки; б) диоды с p-n переходом; в) p-i-n диоды; г) туннельные и резонансно-туннельные диоды. Правильный ответ: а) и г).

13.	Быстродействие резонансно-туннельных диодов ограничивают ... а) время максвелловской (диэлектрической) релаксации; б) время туннелирования электрона сквозь барьеры; в) время жизни электрона в квантовой яме; г) барьерная емкость и последовательное сопротивление структуры. Правильный ответ: в) и г).
14.	Сверхтонкая база биполярного СВЧ транзистора обеспечивает... а) увеличение выходной мощности; б) уменьшение времени переноса носителей заряда; в) увеличение обратного напряжения коллекторного перехода; г) увеличение коэффициента усиления. Правильный ответ: б).
15.	Эффект отеснения тока эмиттера в биполярных СВЧ транзисторах связан ... а) с двумерным пространственным распределением тока между эмиттером и коллектором; б) с отсутствием нагрузочного сопротивления в цепи коллектора; в) с увеличением емкости эмиттерного перехода; г) с эффектом Кирка (диффузионным расширением базы в коллекторную область). Правильный ответ: а) и г).
16.	Максимальная частота работы МОП-транзистора в режиме насыщения от длины канала L зависит... а) пропорционально L; б) обратно пропорционально L; в) обратно пропорционально L^2; г) не зависит от L. Правильный ответ: б).
17.	Минимальная длина канала МОП-транзистора, при которой ВАХ сохраняет длинноканальный характер, зависит от ... а) толщины подзатворного слоя; б) ширины канала; в) глубины р-п переходов; г) толщины ОПЗ истока и стока. Правильный ответ: а), в) и г).
18.	Для уменьшения времени пролета электронов через канал полевого транзистора следует... а) увеличивать толщину подложки транзистора; б) уменьшать длину затвора; в) повышать подвижность электронов в канале транзистора; г) снижать концентрацию электронов под выводом затвора. Правильный ответ: б) и в).
19.	Особенностью гетероструктурного биполярного СВЧ транзистора является... а) замена эмиттерного перехода обычного биполярного транзистора на гетеропереход; б) использование широкозонного полупроводника для области эмиттера; в) использование узкозонных полупроводников для областей эмиттера и базы; г) использование широкозонных полупроводников для областей базы и коллектора. Правильный ответ: а) и б).

20.	Особенностью гетероструктурного полевого СВЧ транзистора (HEMT) является... а) использование модуляционного легирования; б) использование двумерного электронного газа в канале транзистора; в) использование двухбарьерной структуры с квантовой ямой; г) использование многобарьерной квантовой структуры (полупроводниковой сверхрешетки). Правильный ответ: а) и б).
-----	--

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1.	Образец арсенида галлия легирован донорной примесью до концентрации $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Считая примесь полностью ионизованной, найти концентрации основных и неосновных носителей при комнатной температуре. Собственная концентрация $n_i = 1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$. Ответ: 10^{17} см^{-3}; $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$.
2.	Образец кремния n-типа имеет следующие параметры: удельное сопротивление $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, подвижность электронов $1600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, подвижность дырок $600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, собственная концентрация носителей $1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Определить равновесные концентрации электронов и дырок. Ответ: $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $2,45 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.
3.	Найти концентрацию основных носителей и объемный потенциал (потенциал Ферми) в германии марки ГДА-10 при температуре $T=300 \text{ К}$. Собственная концентрация $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Ответ: $3,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $0,067 \text{ В}$.
4.	Найти удельное сопротивление электронного и дырочного кремния с легирующей примесью $N_d = N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $T=300 \text{ К}$. Ответ: $0,42 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $1,05 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.
5.	Оценить величину дебаевской длины экранирования в кремнии n-типа с удельным сопротивлением $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T=300 \text{ К}$. Ответ: $0,13 \text{ мкм}$.
6.	Оценить время жизни неосновных носителей в полупроводнике n-типа, скорость рекомбинации дырок в котором $10^{18} \text{ см}^{-3}/\text{с}$, а избыточная концентрация 10^{13} см^{-3}. Ответ: 10 нс.
7.	Определить величину потенциального барьера (контактную разность потенциалов) кремниевого p-n перехода с $N_d = N_a = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $T=300 \text{ К}$. Ответ: $0,65 \text{ В}$.
8.	Резкий симметричный кремниевый p-n переход имеет примесные концентрации $N_d = N_a = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и находится при комнатной температуре в равновесном состоянии. Рассчитать ширину обедненного слоя и максимальное электрическое поле. Ответ: $0,66 \text{ мкм}$; $2 \cdot 10^4 \text{ В/см}$.
9.	Кремниевый диод формируется путем диффузии высокой концентрации бора в легированную фосфором пластину толщиной 350 мкм, имеющую удельное сопротивление $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Глубина p-n перехода равна $0,5 \text{ мкм}$, а площадь поперечного сечения 10^{-4} см^2. Переход можно рассматривать как односторонний и резкий. Найти ток насыщения диода, если время жизни неосновных носителей в подложке равно 1 нс. Ответ: $1,2 \cdot 10^{-14} \text{ А}$.
10.	Найти высоту потенциального барьера (падение напряжения на области объемного заряда) в диоде Шоттки, сформированном нанесением золота на

	германий p-типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Ответ: 0,78 В.
11.	Рассчитать величину тока в кремниевом p-n переходе при внешних смещениях $V = +0,5$ В и $V = -0,5$ В. Площадь перехода $S = 1$ мм ² , уровни легирования $N_d = 10^{14}$ см ⁻³ , $N_a = 10^{16}$ см ⁻³ . Ответ: $j_s = 5,3 \cdot 10^{-13}$ А·см ⁻² ; $I(V = +0,5 \text{ В}) = 0,13$ мА, $I(V = -0,5 \text{ В}) = 5,3 \cdot 10^{-13}$ А
12.	В туннельном диоде из Ge при $T = 300$ К с типичными для этого диода уровнями легирования ($N_d = 2 \cdot 10^{19}$ см ⁻³ , $N_a = 5 \cdot 10^{19}$ см ⁻³) значения энергий Ферми составляют $\Delta_n = 34$ мэВ и $\Delta_p = 124$ мэВ. Определить напряжение при котором на прямой ветви ВАХ имеется минимум. Ответ: 0,158 В.
13.	Схематически изобразить и пояснить диаграмму энергетических зон p ⁺ -i-n ⁺ структуры в состоянии равновесия, при прямом и обратном смещениях. Чему равна контактная разность потенциалов такой структуры на кремнии? Ответ: 1,1 В.
14.	Ток коллектора биполярного транзистора, работающего в режиме насыщения, равен 10 мА, коэффициент передачи тока базы 50, коэффициент насыщения 1,2. Определить ток базы. Ответ: 240 мкА.
15.	Для биполярного p-n-p транзистора задано: $I_{pэ} = 1$ мА; $I_{nэ} = 0,01$ мА; $I_{рк} = 0,98$ мА; $I_{нк} = 0,001$ мА. Вычислите: статический коэффициент передачи тока базы; эффективность эмиттера (коэффициент инжекции); ток базы и коэффициент передачи тока в схемах с ОБ и ОЭ. Ответ: 0,98; 0,99; 30 мкА; 0,97; 33.
16.	Кремниевый диффузионный p-p-n транзистор имеет ширину базы без ОПЗ 0,23 мкм. Вычислить время пролета базы и граничную частоту. Ответ: $9,2 \cdot 10^{-12}$ с; 17,3 ГГц.
17.	Вычислить удельную емкость слоя SiO ₂ толщиной 0,1 мкм. Ответ: 33,5 нФ/см ² .
18.	В интегральной схеме сформирован МОП конденсатор емкостью 200 пФ и толщиной оксидного слоя 50 нм. Найти площадь, занимаемую этим конденсатором на кристалле, считая относительную диэлектрическую постоянную оксида равной 3,9. Ответ: 0,29 мм ² .
19.	Найти величину напряжения плоских зон в идеальных МОП структурах с алюминиевым затвором, изготовленных на кремнии p- и r-типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Дать схематическое изображение зонных диаграмм этих структур в состоянии теплового равновесия и в режиме плоских зон. Ответ: - 0,17 В; - 0,90 В.
20.	Рассчитать пороговое напряжение в МОП структурах с алюминиевым затвором, изготовленных на кремнии p- и r-типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Толщина окисла 100 нм, плотность эффективного поверхностного заряда $8 \cdot 10^{-9}$ Кл/см ² . Ответ: 1,18 В; - 2,02 В.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1.	В образце кремния p-типа с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см делается p-n переход с примесной концентрацией N_a , в 1000 раз превышающей концентрацию примеси p-типа. Рассчитать встроенный потенциал и объемный потенциал p-области такого перехода.
----	---

	Ответ: 0,75 В; 0,29 В.
2.	Концентрация электронов в однородном слаболегированном n-Si при комнатной температуре линейно спадает от 10^{17} см^{-3} при $x = 0$ до $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $x = 2 \text{ мкм}$ и все время поддерживается постоянной. Найти плотность тока электронов при отсутствии электрического поля. Подвижность при данном уровне легирования считать равной $1000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Ответ: 825 А/см^2.
3.	Принципиальное (физическое) ограничение быстродействия диодов Шоттки определяется временем максвелловской (диэлектрической) релаксации. Оценить это время в кремнии с типичным для СВЧ диодов Шоттки удельным сопротивлением n-области $0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Ответ: 10^{-13} с.
4.	Определить величину понижения барьера в кремниевом диоде Шоттки за счет сил изображения (эффекта Шоттки), если в приконтактной области диода создано электрическое поле напряженностью 10^5 В/см. Ответ: 35 мэВ.
5.	Имеется резкий симметричный кремниевый p-n переход при температуре $T = 300 \text{ К}$ с площадью $S = 10^{-3} \text{ см}^2$ и концентрацией легирующих примесей $N_d = N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Вычислить время за которое обратное смещение возрастет от 0 до -10 В, если ток через диод равен 1 мА. Ответ: $3,26 \cdot 10^{-7} \text{ с}$.
6.	Определить величину потенциального барьера и толщину обедненного слоя p-n перехода из германия с типичными для туннельных диодов уровнями легирования ($N_d = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) при $T = 300 \text{ К}$. Ответ: $0,818 \text{ В}$; 10 нм.
7.	Кремниевый лавинно-пролетный диод Рида со структурой $p^+ - n - i - n^+$ работает в пролетном режиме. Оценить оптимальную длину области дрейфа этого диода для возбуждения колебаний с частотой 10 ГГц. Ответ: 5 мкм.
8.	Оценить время формирования домена в диоде Ганна из арсенида галлия с удельным сопротивлением $7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Принять, что подвижность электронов в арсениде галлия составляет $8500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, относительная диэлектрическая постоянная равна 13, отрицательная дифференциальная подвижность при заданном напряжении на диоде $-2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Ответ: $3,6 \cdot 10^{-12} \text{ с}$.
9.	Для выполнения условий, необходимых для работы диода Ганна в режиме пролета домена, оценить минимальную длину образца арсенида галлия с равновесной концентрацией электронов $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и частоту осцилляций в таком образце. Для оценки воспользоваться критерием Кремера и считать, что скорость движения домена $v_d = 1,5 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, дифференциальная подвижность $\mu_{\text{диф}} = -2200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Ответ: 1 мкм; 150 ГГц.
10.	Для кремниевого биполярного транзистора оценить время пролета носителей через обедненный слой коллекторного перехода толщиной 1 мкм. Ответ: 10^{-11} с.
11.	Оценить ток коллектора p-n-p транзистора с площадью поперечного сечения 1 мм^2 и концентрацией избыточных неосновных носителей в базе около эмиттерного перехода 10^{14} см^{-3} (за счет инжекции через переход эмиттер-база). Активная толщина базы 20 мкм, подвижность электронов $3900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, транзистор находится при комнатной температуре. Ответ: $8,1 \text{ мА}$.

12.	При экспоненциальном распределении примеси в базе n-p-n транзистора напряженность электрического поля E постоянна. Найти в этом случае концентрацию неосновных носителей вблизи коллектора, если уровень легирования около эмиттера $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина базы транзистора 0,3 мкм, а $E = 4000 \text{ В/см}$. Ответ: 10^{15} см^{-3}.
13.	В интегральной схеме сформирован МОП конденсатор емкостью 200 пФ и толщиной оксидного слоя 50 нм. Найти площадь, занимаемую этим конденсатором на кристалле, считая относительную диэлектрическую постоянную оксида равной 3,9. Ответ: 0,29 мм².
14.	Подложка кремниевой МОП структуры содержит $N_t = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ центров генерации-рекомбинации, расположенных на уровне Ферми для материала с собственной проводимостью, сечения захвата носителей заряда $\sigma_t = 10^{-15} \text{ см}^2$, тепловая скорость $v_t = 10^7 \text{ см/с}$. Вычислить время жизни и скорость генерации в режиме глубокого неравновесного обеднения структуры. Собственная концентрация $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Ответ: 10^{-7} с; $7,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}/\text{с}$.
15.	МОП структура находится в режиме глубокого неравновесного обеднения. Рассчитать плотность поверхностных состояний, при которой скорость поверхностной генерации вдвое превышает скорость генерации в обедненной области полупроводника. Считать, что сечения захвата носителей заряда равны $\sigma_t = 10^{-15} \text{ см}^2$, тепловая скорость $v_t = 10^7 \text{ см/с}$, постоянная времени $\tau = 1 \text{ мкс}$, ширина ОПЗ $W = 1 \cdot 10^{-6} \text{ см}$. Ответ: $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.
16.	Найти пороговое напряжение n-канального кремниевых МОП транзистора с алюминиевым затвором, если уровень легирования подложки равен 10^{15} см^{-3}, толщина оксидного слоя 100 нм, заряд в окисле 10^{-8} Кл/см^2, поверхностные состояния отсутствуют. Ответ: 1,51 В.
17.	Оценить удельную крутизну g_m/W n-канального кремниевых МОП транзистора с длиной канала 1 мкм и толщиной оксидного слоя 35 нм при напряжении на стоке 1В. Подвижность электронов в канале считать равной $500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, относительную диэлектрическую постоянную оксида 3,9. Ответ: 50 См/см.
18.	МОП транзистор с отношением ширины к длине канала $W/L = 5$, толщиной оксида 80 нм и подвижностью электронов $600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ предполагается использовать как управляемый резистор. Рассчитать превышение затворного напряжения над пороговым напряжением, при котором сопротивление транзистора при малых напряжениях на стоке равно 2,5 кОм. Ответ: 3,1 В.
19.	Изготовителю нужно сделать n-канальный обедненный МОП транзистор без применения ионного легирования. Заранее отработанный технологический процесс обеспечивает получение плотности эффективного поверхностного заряда величиной 10^{11} см^{-2}. Толщина оксида равна 50 нм, затворы делаются из алюминия. Провести расчет и показать, пригоден ли указанный технологический процесс для изготовления обедненных МОП транзисторов на кремниевых пластинах марки КДБ-12. Ответ: $V_T = -0,34 \text{ В}$; пригоден.
20.	Построить зонную диаграмму гетероперехода n-Ge – p-GaAs с концентрациями легирующих примесей $N_d = N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Рассчитать величину контактной разности потенциалов, ширину областей обеднения и величины

разрывов энергетических зон.
Ответ: $eU_k=1,15$ эВ; $W_{Ge}=W_{GaAs}=0,28$ мкм; $\Delta E_c = 0,07$ эВ; $\Delta E_v = 0,84$ эВ.

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

1. Особенности СВЧ диапазона и классификация СВЧ приборов.
2. Свойства р-п перехода в СВЧ диапазоне.
3. Вольт-амперная характеристика р-п перехода.
4. Барьерная и диффузионная емкости р-п перехода. Эквивалентная схема р-п перехода.
5. Технологические особенности изготовления диодов СВЧ диапазона.
6. Полупроводниковые диоды в качестве детекторов слабых сигналов.
7. Детекторный СВЧ диод с переходом металл-полупроводник. Параметры и характеристики.
8. Детекторный СВЧ диод с р-п переходом. Параметры и характеристики.
9. Смесительный СВЧ диод. Параметры и характеристики.
10. Гетеродинный метод приема слабых сигналов. Чувствительность гетеродинной схемы.
11. Основные типы нелинейной полупроводниковой емкости. Вольт-фарадная характеристика.
12. Диоды с накоплением заряда. Параметры и характеристики.
13. Варакторный диод. Основные параметры и характеристики.
14. Применение диодов с нелинейной емкостью.
15. Туннельный диод. Вольт-амперная характеристика.
16. Туннельный диод. Параметры, применение.
17. Принцип действия, параметры и характеристики диода Шоттки.
18. Вольт-амперная характеристика диода Шоттки.
19. Принцип действия, параметры и характеристики р-і-п диода.
20. Лавинно-пролетный диод. Параметры и характеристики.
21. Инжекционно-пролетный диод. Параметры и характеристики.
22. Диод Ганна. Требования к зонной структуре полупроводника. ВАХ. Зарядовая неустойчивость в приборах с ОДС. Генерация СВЧ колебаний.
23. Диод Ганна. Режимы работы. Характеристики и параметры.
24. Резонансное туннелирование в двухбарьерной структуре и сверхрешетке. ВАХ.
25. Резонансно-туннельные диоды и транзисторы. Устройство и принцип действия.
26. Биполярный транзистор СВЧ. Устройство и принцип действия.
27. Биполярный транзистор СВЧ. Параметры и характеристики.
28. Гетероструктурный БТ. Устройство и принцип действия.
29. Полевой транзистор с барьером Шоттки. Устройство и принцип действия.
30. Полевой транзистор с барьером Шоттки. Частотные и шумовые свойства.
31. Гетероструктурный ПТ. Устройство и принцип действия. Приборы высокотемпературной электроники на SiC и GaN. Применение

биполярных и полевых СВЧ транзисторов.

7.2.5 Примерный перечень заданий для подготовки к экзамену

Не предусмотрено учебным планом

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация осуществляется по нескольким критериям:

1. Тестирование по темам курса с помощью тест-заданий.

1. Оценка «неудовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил правильно на 40% вопросов и меньше.

2. Оценка «удовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил правильно на 40-60% вопросов.

3. Оценка «хорошо» ставится в случае, если студент ответил правильно на 60-80% вопросов.

4. Оценка «отлично» ставится в случае, если студент ответил правильно на 80% вопросов и больше.

2. Ответы на практических (семинарских) занятиях по темам курса.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Основы физических процессов в СВЧ приборах	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита реферата
2	Свойства р-п перехода и барьера Шоттки в СВЧ диапазоне	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита реферата
3	Полупроводниковые СВЧ диоды	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита реферата
4	Гетероструктурные СВЧ приборы	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита реферата
5	Биполярные и полевые СВЧ транзисторы	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита реферата
6	СВЧ приборы при экстремальных температурах	ПК-6	Тест, контрольная работа, защита реферата

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи

компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Основная литература

1. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов : учебное пособие / А.И. Лебедев. - Москва : Физматлит, 2008. - 488 с. - ISBN 978-5-9221-0995-6. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68403>.
2. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие. - 2-е изд., доп. - М. : Техносфера, 2005. - 408 с. - (Мир электроники). - ISBN 5-94836-060-1 : 300-00.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах, Кн 1, Кн. 2. Пер с англ.-2-е перераб. и доп. изд.-М.: Мир, 1984.-Кн.1.-456 с., Кн.2.-456 с.
4. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы [Электронный ресурс] / Пасынков В. В., Чиркин Л. К., - 9-е изд. - : Лань, 2009. - 480 с. - ISBN 978-5-8114-0368-4.
URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=300

Дополнительная литература

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 1999. -376 с.
2. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ.-М.: Мир, 1989.- 630с.
3. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов/Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков; Под ред. В.А. Лобунцова.-М.:Энергоатомиздат, 1990.-576 с.
4. Березин В.М., Буряк В.С., Гутцайт Э.М., Марин В.П. Электронные приборы СВЧ: Учебное пособие для вузов по спец. «Электронные приборы» – М.: Высш. шк., 1985. – 296 с.
5. Нойкин Ю.М. Полупроводниковые приборы СВЧ: учебное пособие / Нойкин Ю.М., Нойкина Т.К., Усаев А.А. – Ростов-на-Дону, 2014 – 117 с.

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

Microsoft Word, Microsoft Excel, Internet Explorer, Origin

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Научно-учебная лаборатория кафедры ФТТ, компьютерный класс(аудитории 221, 226а первого корпуса ВГТУ).

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Физические основы СВЧ-электроники» читаются лекции, проводятся практические занятия.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета параметров, процессов и характеристик твердотельных приборов СВЧ диапазона. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
----------	-----------------------------	----------------------------	--