

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

Декан

А. Г. Коротаев

Оценочные материалы по дисциплине

Дополнительные главы полупроводниковой электроники

по направлению подготовки

03.03.03 Радиофизика

Профиль подготовки:

Киберфизические системы, прикладная электроника и квантовые технологии

Форма обучения

Очная

Квалификация

Радиофизик-кибернетик, преподаватель. Разработчик киберфизических и квантовых систем

Год приема

2024

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОПОП

О.А. Доценко

Председатель УМК

А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

БК-1 Способен применять общие и специализированные компьютерные программы при решении задач профессиональной деятельности

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности

ПК-2 Способен проводить математическое моделирование процессов в приборах и устройствах радиофизики и электроники, владеть современными отечественными и зарубежными пакетами программ при решении профессиональных задач

ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

РОБК 1.1 Знает правила и принципы применения общих и специализированных компьютерных программ для решения задач профессиональной деятельности

РОБК 1.2 Умеет применять современные ИТ-технологии для сбора, анализа и представления информации; использовать в профессиональной деятельности общие и специализированные компьютерные программы

РООПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

РОПК 2.3 Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники.

РОПК 3.1 Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.

РОПК 3.2 Умеет проводить радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

- устные и письменные опросы;
- лабораторные работы.

В ходе устных и письменных опросов по теоретическому материалу проверяется достижение обучающимися следующих результатов обучения: РОБК 1.2 (Умеет применять современные ИТ-технологии для сбора, анализа и представления информации; использовать в профессиональной деятельности общие и специализированные компьютерные программы), РООПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности), РОПК 3.1 (Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач).

Результаты опросов оцениваются оценками «зачтено» или «не зачтено».

Контрольные вопросы по теоретическому материалу (РОБК 1.2, РООПК 1.3, РОПК 3.1)

1. В чём отличие модели Бардина от модели Шоттки – Мотта для контакта металл – полупроводник?

2. Почему высота барьера Шоттки Φ_0 может слабо зависеть от работы выхода металла?
3. Что такое эффект Шоттки и как он сказывается на вольт-амперной характеристике диода Шоттки?
4. В каком случае необходимо использовать термоэмиссионно-диффузионную теорию для описания протекания тока через барьер Шоттки?
5. Как изменяются прямая и обратная ветви ВАХ диода Шоттки, если величина тока ограничивается не термоэлектронной эмиссией, а скоростью движения электронов в ОПЗ?
6. Какой ток называется термоэлектронно-полевым током в барьере Шоттки?
7. Как по температурному поведению вольт-амперной характеристики отличить прямой ток надбарьерной эмиссии от туннельного тока в диоде Шоттки?
8. Как по вольт-амперной характеристике диода Шоттки определить высоту барьера Φ_0 и показатель неидеальности n ВАХ?
9. Как зависят параметры ОПЗ p - n -перехода (U_K , d , C_{p-n} , $U_{проб}$) от типа полупроводникового материала и концентраций легирующих примесей?
10. Решение какого уравнения позволяет найти градиент концентрации носителей заряда в данной точке полупроводника?
11. Решение какого уравнения позволяет найти напряжённость электрического поля в данной точке полупроводника?
12. Как зависят ток инжекции и ток экстракции в диодной теории p - n -перехода от типа полупроводникового материала и концентраций легирующих примесей?
13. Как изменяется ток насыщения p - n -перехода I_S при уменьшении толщины базы W_n в случае, когда $W_n < L_p$?
14. От каких параметров полупроводника зависит напряжение лавинного пробоя p - n -перехода?
15. Как изменяются параметры плавного p - n -перехода при увеличении градиента разностной концентрации примеси a ?
16. Почему при наличии точечных структурных дефектов в ОПЗ ухудшаются инжекционные свойства p - n -перехода и увеличивается его обратный ток?
17. Почему в области дислокации могут изменяться ширина запрещённой зоны, ширина ОПЗ p - n -перехода и время жизни носителей заряда?
18. Почему средняя плотность тока в дислокационной трубке, пересекающей ОПЗ, может быть существенно выше, чем в ненарушенной части p - n -перехода?
19. Как влияет инверсный слой на величину обратного тока p - n -перехода?
20. Как влияет обогащённый слой вдоль поверхности базы на вольт-амперную характеристику p - n -перехода?
21. Как можно устранить поверхностный пробой p - n -перехода?
22. Как построить энергетическую диаграмму идеального резкого гетероперехода в модели Андерсона?
23. Как и почему влияют граничные электронные состояния на энергетическую диаграмму гетероперехода?
24. Как влияют граничные электронные состояния на вольт-амперную характеристику резкого гетероперехода?
25. Как построить энергетическую диаграмму гетероперехода с большой концентрацией дефектов на гетерогранице, используя концепцию уровня зарядовой нейтральности?
26. В чём особенность квазиэлектрических полей в варизонном полупроводнике (по сравнению с электрическим полем ОПЗ) и как они влияют на диффузию носителей заряда?
27. Как рассчитать напряжённость квазиэлектрического поля для неосновных носителей заряда в полупроводнике с постоянной концентрацией основных носителей?

28. Чем схожи и чем отличаются характеристики варизонной $p-n$ -структуры и резкого $p-n$ -гетероперехода?
29. Какая часть ИМС называется элементом?
30. Какая часть ИМС называется компонентом?
31. Изобразите структуру интегрального биполярного транзистора и назовите его особенности.
32. Качественно изобразите профили концентраций примесей в интегральной транзисторной $n+-p-n$ -структуре.
33. Дайте определение удельному поверхностному сопротивлению и укажите его размерность.
34. Изобразите структуру интегрального диода с наибольшим быстродействием.
35. Изобразите структуру интегрального диода с максимально допустимым прямым током.
36. Изобразите структуру резистора с наименьшим ТКС.
37. Изобразите структуру «пинч»-резистора.
38. Изобразите структуру диффузионного конденсатора с наибольшей удельной ёмкостью.
39. Охарактеризуйте суть метода разделительной диффузии при эпитаксиально-планарной технологии ИМС.
40. Поясните суть способа изоляции элементов ИМС при *EPIC*-процессе.
41. Поясните суть технологии комбинированной изоляции «Изопланар-1».
42. Какая структура называется идеальной МДП-структурой?
43. Что называется поверхностным потенциалом?
44. Какое напряжение называется напряжением плоских зон?
45. При каких значениях поверхностного потенциала ϕ_s идеальная структура металл – диэлектрик – полупроводник p -типа находится в режимах: плоских зон, обеднения основными носителями, обогащения, сильной инверсии?
46. Изобразите вольт-фарадную характеристику такой структуры при низкой частоте измерительного сигнала.
47. Изобразите семейство выходных характеристик и передаточную характеристику МДП-транзистора с индуцированным каналом.
48. Изобразите структуру диода в МДП-микросхеме.
49. Назовите возможные варианты включения МДП-транзистора в качестве резистора.
50. Изобразите структуру МДП-конденсатора.

Текущая аттестация по лабораторным работам направлена на проверку достижения обучающимися следующих результатов обучения: РОБК 1.1 (Знает правила и принципы применения общих и специализированных компьютерных программ для решения задач профессиональной деятельности), РОПК 3.1 (Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач), РОПК 2.3 (Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники), РОПК 3.2 (Умеет проводить радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля).

Эта аттестация включает устные опросы обучающихся, выполнение ими индивидуальных заданий и представление по ним отчётов. Отчет по лабораторной работе должен содержать изложение цели работы, основных этапов и приемов ее достижения, полученных результатов, анализ результатов и выводы.

Результаты выполнения лабораторных работ оцениваются оценками «зачтено» или «не зачтено» в соответствии с таблицей 1 (см. ниже).

Примеры индивидуальных заданий по лабораторным работам

Индивидуальное задание 1

Расчет параметров однородного полупроводника в равновесном состоянии:

- сформировать двухмерную модель однородно легированного полупроводника для расчета его характеристик;
- провести приборное моделирование созданной структуры в равновесном состоянии при разных температурах;
- на основе результатов моделирования определить следующие параметры структуры: сродство к электронам, положение «дна» зоны проводимости и «потолка» валентной зоны, ширину запрещенной зоны, положение уровня Ферми, встроенный потенциал, собственную концентрацию свободных носителей заряда, концентрацию свободных электронов и дырок.

Индивидуальное задание 4

Расчет параметров $p-n$ -перехода:

- сформировать двухмерную модель $p-n$ -перехода с двумя контактами для расчета его характеристик;
- на основе приборного моделирования получить распределение: подвижности и времени жизни неосновных носителей в базе, результирующее распределение примеси, концентрации электронов и дырок для минимального и максимального напряжения на $p-n$ -переходе;
- на основе полученных распределений определить: ширину базы, концентрацию неосновных носителей на границах базы, значения подвижности и времени жизни неосновных носителей на правой границе базы, диффузионную длину неосновных носителей в базе;
- на основе приборного моделирования построить вольт-амперную характеристику.

Индивидуальное задание 6

Расчет параметров МОП-структуры:

- сформировать модель МОП-структуры для расчета его характеристик;
- на основе приборного моделирования построить: распределение примеси в одномерном вертикальном сечении, потенциала;
- на основе приборного моделирования рассчитать: величину потенциала подложки $\varphi_{\text{п}}$, потенциала на поверхности подложки $\varphi(x=0)$ и рассчитать поверхностный потенциал $\varphi_s = |\varphi(x=0) - \varphi_{\text{п}}|$ при разных концентрациях примеси в подложке, концентрацию электронов и дырок на поверхности подложки.

Таблица 1. Критерии оценивания результатов обучения

Результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения	
	Не зачтено	Зачтено
РОБК 1.1 Знает правила и принципы применения общих и специализированных	Не владеет методами численного расчёта характеристик полупроводниковых	Проводит численный расчёт электрических характеристик полупроводниковых структур с использованием пакета программ.

компьютерных программ для решения задач профессиональной деятельности.	структур с использованием пакетов программ.	
РОПК 3.1 Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.	Не имеет представления о принципах действия, характеристиках и теоретических моделях полупроводниковых барьерных структур.	Способен описать принципы действия, характеристики и теоретические модели полупроводниковых приборных структур.
РОПК 2.3 Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники.	Не имеет представления об области применения и общей структуре программного пакета TCAD Sentaurus. Не способен провести моделирование характеристик простой полупроводниковой структуры.	Имеет необходимое представление об общей структуре, назначении подпрограмм пакета TCAD Sentaurus и его возможностях. Уверенно использует средства пакета TCAD Sentaurus для моделирования и построения характеристик $p-n$ -переходов и транзисторных структур.
РОПК 3.2 Умеет проводить радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля.	Не имеет представления о теоретических моделях для определения и описания характеристик полупроводниковых структур и приборов.	Понимает содержание теоретических моделей и способен их использовать для определения и описания характеристик полупроводниковых приборов.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Промежуточная аттестация проводится в восьмом семестре в форме устного зачёта с оценкой по теоретическому материалу. К зачёту допускаются только студенты, успешно прошедшие текущие аттестации по лабораторным работам. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Билет для зачёта содержит вопросы, позволяющие проверить достижение обучающимися следующих результатов обучения РОБК 1.2 (Умеет применять современные ИТ-технологии для сбора, анализа и представления информации; использовать в профессиональной деятельности общие и специализированные компьютерные программы), РООПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности), РОПК 3.1 (Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач)..

В качестве дополнительных вопросов во время зачёта используются контрольные вопросы по теоретическому материалу (см. выше).

Результаты промежуточной аттестации по дисциплине характеризуются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно» в соответствии с таблицей 2 (см. ниже).

Примеры билетов для теоретического зачёта (ИОПК 1.3, ИПК 2.1)

Билет № 1

Вопрос 1. Как зависят параметры ОПЗ $p-n$ -перехода (U_K , d , C_{p-n} , \mathcal{E}_m , $U_{\text{проб}}$) от типа полупроводникового материала и концентраций легирующих примесей?

Вопрос 2. Изобразите структуру интегрального биполярного транзистора и назовите его особенности.

Билет № 2

Вопрос 1. Почему поверхность $p-n$ -структуры может влиять на её электрические характеристики?

Вопрос 2. Поясните суть способа изоляции элементов интегральной микросхемы при EPIC-процессе.

Таблица 2 – Критерии оценивания результатов обучения при промежуточной аттестации

Результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
РОБК 1.2 Умеет применять современные ИТ-технологии для сбора, анализа и представления информации; использовать в профессиональной деятельности общие и специализированные компьютерные программы.	Не имеет представления о теоретических моделях и использовании прикладных программ для расчётов и анализа характеристик полупроводниковых структур и приборов.	Имеет общее представление о характеристиках полупроводникового прибора. Понимает содержание теоретических моделей и роль прикладных программ для расчёта характеристик полупроводниковых приборов, но допускает существенные ошибки при анализе результатов моделирования.	Допускает отдельные неточности в описании основных характеристик полупроводникового прибора. Проводит теоретические расчёты и анализ характеристик полупроводниковых приборов, допуская незначительные ошибки.	Имеет полное представление о функциональном назначении и основных характеристиках полупроводникового прибора. Свободно использует теоретические модели и прикладные программы для расчётов характеристик полупроводниковых приборов.

<p>РООПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.</p>	<p>Не способен объяснить математические выражения, описывающие характеристики полупроводникового прибора и процессы, лежащие в основе его действия. Не понимает смысла полученных результатов расчётов и экспериментов.</p>	<p>Способен, при ряде затруднений, математически описать характеристики полупроводникового прибора и процессы, лежащие в основе его действия. Путаётся в понимании полученных результатов теоретических расчётов и экспериментов.</p>	<p>Допускает мелкие неточности при математическом описании характеристик и физических процессов, лежащих в основе действия полупроводникового прибора. Грамотно интерпретирует результаты теории и эксперимента, допуская незначительные ошибки.</p>	<p>Способен математически описать характеристики и физические процессы, лежащие в основе действия полупроводниковых приборов различного назначения. Свободно и убедительно интерпретирует теоретические и экспериментальные результаты.</p>
<p>РОПК 3.1 Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.</p>	<p>Не имеет представления о принципе действия и назначении полупроводникового прибора.</p>	<p>Неполные знания принципов действия полупроводниковых барьерных структур и областей их применения.</p>	<p>В целом успешное, но с отдельными пробелами, знание принципов действия полупроводниковых барьерных структур и областей их применения.</p>	<p>Уверенное знание принципов действия полупроводниковых барьерных структур, областей и способов их применения.</p>

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний

Вопросы теста для оценки остаточных знаний по дисциплине

№	Вопрос	Варианты ответа
1	Область пространственного заряда $p-n$ -перехода образована:	<ul style="list-style-type: none"> а) положительными дырками и отрицательными электронами. б) положительными дырками и отрицательными зарядами акцепторов. в) положительными зарядами акцепторов и отрицательными зарядами доноров. г) положительными зарядами доноров и отрицательными зарядами акцепторов.
2	Гетеропереход – это:	<ul style="list-style-type: none"> а) переход носителя заряда из одного полупроводника в другой. б) переход носителя заряда через границу областей с резко отличающимися уровнями легирования. в) переход носителя заряда между различными долинами зоны проводимости. г) переходная барьерная область на границе двух различных полупроводников. д) переход электрона с глубокого уровня в зону проводимости.

3	Варизонный полупроводник – это:	<p>а) полупроводник, содержащий гетеропереход.</p> <p>б) полупроводник, содержащий квантовую яму.</p> <p>в) полупроводник с монотонным изменением ширины запрещенной зоны.</p> <p>г) полупроводник с плавным изменением концентрации легирующей примеси.</p> <p>д) полупроводник с периодическим изменением химического состава.</p>
4	Величина напряжённости квазиэлектрического поля, действующего на электроны в полупроводнике p -типа (при $N_c = \text{const}$), определяется выражением:	<p>а) $\frac{1}{e} \cdot \frac{dN_d}{dx}$.</p> <p>б) $\frac{1}{e} \cdot \frac{dN_a}{dx}$.</p> <p>в) $\frac{1}{e} \cdot \frac{dE_c}{dx}$.</p> <p>г) $\frac{1}{e} \cdot \frac{dE_v}{dx}$.</p> <p>д) $\frac{1}{e} \cdot \frac{dF}{dx}$.</p>
5	Использование гетероперехода между эмиттером и базой в биполярном гетеротранзисторе позволяет:	<p>Выберите один или несколько вариантов.</p> <p>а) уменьшить толщину базы.</p> <p>б) увеличить подвижность носителей в базе.</p> <p>в) уменьшить ёмкость эмиттерного перехода.</p> <p>г) уменьшить ёмкость коллекторного перехода.</p> <p>д) уменьшить сопротивление базы.</p> <p>е) уменьшить сопротивление эмиттерной области.</p>
6	Наличие гетероперехода в <i>HEMT</i> -транзисторе позволяет:	<p>а) улучшить инжекцию электронов из эмиттера в базу.</p> <p>б) уменьшить толщину базы транзистора.</p> <p>в) уменьшить длину канала транзистора.</p> <p>г) изолировать канал от подложки.</p> <p>д) пространственно разделить электроны и доноры.</p> <p>е) пространственно разделить электроны и дырки.</p>
7	Скрытый слой под коллектором создают для:	<p>а) лучшей изоляции элементов ИС друг от друга.</p> <p>б) уменьшения сопротивления коллекторной области.</p> <p>в) уменьшения ёмкости коллекторного перехода.</p> <p>г) минимального искажения геометрических размеров элементов ИС.</p>
8	Интегральный диод с наименьшим временем переключения создаётся при	<p>а) выводы к базе и эмиттеру, цепь коллектора разомкнута (вариант Б–Э).</p> <p>б) выводы к базе и коллектору, цепь базы</p>

	следующем соединении областей транзисторной структуры:	разомкнута (Б–К). в) выводы к базе, закороченной с эмиттером, и к коллектору (БЭ–К). г) выводы к базе, закороченной с коллектором, и к эмиттеру (БК–Э). д) выводы к базе и к эмиттеру, закороченному с коллектором (Б–ЭК).
9	Пинч-резисторы изготавливаются на основе следующих областей транзисторной структуры:	а) части эмиттерной области. б) части базовой области. в) части коллекторной области. г) скрытого слоя коллектора. д) верхней части подложки.
10	Изопланарная технология изоляции элементов кремниевых интегральных микросхем относится к числу методов:	а) изоляции обратносмещённым $p-n$ -переходом. б) изоляции диэлектриком. в) комбинированной изоляции.
11	Режим обеднения основными носителями в МДП-структуре $Al-SiO_2-p-Si$ достигается при выполнении условия:	а) $\varphi_s = 0$. б) $\varphi_s < 0$. в) $0 < \varphi_s < \varphi_v$. г) $0 < \varphi_v < \varphi_s < 2\varphi_v$. д) $0 < 2\varphi_v < \varphi_s$.
12	КМДП-микросхемы по сравнению с МДП-микросхемами характеризуются:	Выберите один или несколько вариантов. а) более высокой плотностью упаковки элементов. б) более простой технологией изготовления. в) меньшим потреблением энергии. г) большими функциональными возможностями. д) лучшей изоляцией элементов от подложки.

Ключи к вопросам теста

1 г)	4 в)	7 б)	10 в)
2 г)	5 а), в), д)	8 г)	11 в)
3 в)	6 д)	9 б)	12 в), г)

Информация о разработчиках

Гермогенов Валерий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, радиофизический факультет НИ ТГУ, кафедра полупроводниковой электроники, профессор;

Тяжев Антон Владимирович, научный сотрудник, лаборатория микроэлектроники мультиспектральной квантовой интроскопии ЦиР «ПТМ» НИ ТГУ.