


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова»
(КБГУ)

Институт электроники, робототехники и искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОПОП

 Р.Ш. Тешев

« 12 » февраля 2025 г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
Б1.О.17.01 «ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

Специальность

11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы

Специализация

Радиоэлектронные системы передачи информации

Квалификация (степень) выпускника

Инженер

Форма обучения

Очная

Нальчик 2025

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Таблица 1

Код и формулировка компетенции	Индикаторы достижения	Планируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУН)
<p>ОПК-2. Способен выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе Профессиональной деятельности, и применять соответствующий физико-математический аппарат для их формализации, анализа и принятия решения.</p>	<p>ОПК-2.1. Способен оперировать научными фактами, опираясь на законы логики</p>	<p>Знать современное состояние области профессиональной деятельности</p>
	<p>ОПК-2.2. Способен осознанно выбирать методы и средства изучения объектов и проблем.</p> <p>ОПК-2.3 Способен применять современные достижения компьютерных технологий для решения практических задач.</p>	<p>Уметь искать и представлять актуальную информацию о состоянии предметной области</p>
		<p>Владеть навыками работы за персональным компьютером, в т.ч. пакетами прикладных программ для разработки и представления документации</p>
<p>ОПК-4. Способен проводить экспериментальные исследования и владеть основными приемами обработки и представления экспериментальных</p>	<p>ОПК-4.1. Способен применять современные методы, средства и оборудование для проведения экспериментальных исследований.</p> <p>ОПК-4.2. Способен</p>	<p>Знать основные методы и средства проведения экспериментальных исследований, системы стандартизации и сертификации.</p> <p>Уметь выбирать способы и средства измерений и проводить экспериментальные исследования.</p>

данных.	анализировать и обобщать данные, получаемые в результате экспериментов. ОПК-4.3. Способен объективно оценивать полученные результаты экспериментальных исследований и погрешности результатов измерений.	Владеть способами обработки и представления полученных данных и оценки погрешности результатов измерений.
---------	--	--

2 Шкала оценивания планируемых результатов обучения

2.1 Текущий контроль

Оценка результатов текущей успеваемости в рамках контрольных точек осуществляется посредством 70-балльной системы, при этом за добросовестное посещение занятий обучающийся может набрать до 10 баллов, за качественное прохождение оценочных мероприятий - до 60 баллов.

Таблица 2

Карта распределения рейтинговых баллов в рамках текущего контроля в 4 семестре

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Лабораторная работа №1 «Электрические свойства электронно-дырочных переходов».	экспериментальная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены

					неверно
2	Лабораторная работа №2 «Температурная зависимость ВАХ и параметров диодов».	экспериментальная	Работа включает в себя 1 задание, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
3	Лабораторная работа №3 «Исследование импульсивных характеристик диодов».	экспериментальная	Работа включает в себя 3 задания, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
4	Лабораторная работа №4 «Изучение статистических характеристик и параметров биполярного транзистора».	экспериментальная	Работа включает в себя 6 заданий, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно

5	Лабораторная работа №5 «Исследование частотных свойств и параметров БТ».	экспериментальная	Работа включает в себя 3 задания, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
6	Лабораторная работа №6 «Исследование полевых транзисторов».	экспериментальная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
7	Лабораторная работа №7 «Исследование статистических параметров маломощных транзисторов и диодов».	экспериментальная	Работа включает в себя 4 задания, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
8	Лабораторная работа №8	экспериментальная	Работа включает в	3	3- все задания выполнены верно,

	«Изучение статистических характеристик управляемых тиристоров типа р-п-р-п».		себя 2 задания, выполняется студентами попарно.		выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 - задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
9	Лабораторная работа №9 «Исследование туннельных диодов».	экспериментальная	Работа включает в себя 4 задания, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 - задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
10	Лабораторная работа №10 «Исследование характеристик полупроводниковых приборов на установке Л2-56».	экспериментальная	Работа включает в себя 8 заданий, выполняется студентами попарно.	3	3- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 2 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 1 - задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
11	Тесты 1	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование	8	Количество баллов пропорционально количеству правильных

			в ЭИОС.		ответов
12	Тесты 2	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	8	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
13	Коллоквиум 1	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	7	7-6– ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 5-4 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 3- ответы недостаточно полные; 2 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 1-ответы не на все вопросы, частичные. 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.
14	Коллоквиум 2	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	7	7-6– ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 5-4 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 3- ответы недостаточно

					полные; 2 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 1-ответы не на все вопросы, частичные. 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.
	Итого:			60	

Карта распределения баллов в рамках промежуточной аттестации

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Экзаменационный билет	Устный опрос	Билет содержит 2 теоретических вопроса. На теоретические вопросы студент должен ответить устно.	Теоретические вопросы – 30 баллов.	<p>Критерии оценивания теоретических вопросов:</p> <p>25 до 30 баллов: Глубокий уровень владения материалом, точное знание ключевых концепций, способность анализировать и интерпретировать факты, грамотно строить высказывания, привести примеры, свободно оперировать терминологией.</p> <p>От 19 до 24 баллов: Базовое владение предметом, умение последовательно раскрыть основную мысль вопроса, грамотное применение терминов, наличие существенных элементов анализа и обобщений, но недостаточное развертывание или отдельные неточности.</p> <p>От 13 до 18 баллов: Частичное освоение материала, попытка объяснить основной смысл вопроса, использование некоторых базовых терминов, но</p>

					отсутствие глубокого понимания сложных моментов, логические недостатки изложения, отсутствие выводов. От 7 до 12 баллов: Ошибочные представления, слабо выраженное владение основными понятиями, значительные затруднения в интерпретации вопросов, существенные фактологические ошибки, отсутствие обоснованных выводов и примеров. От 0 до 6 баллов: Полное непонимание темы, неспособность сформулировать адекватный ответ, грубые ошибки, несоответствие требованиям задания.
--	--	--	--	--	---

3. Оценочные материалы для текущего и промежуточного контроля успеваемости
3.1. Оценочные материалы для текущего контроля

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Цель работы: исследование вольт-амперных характеристик, дифференциальной емкости, дифференциального сопротивления р-п перехода диода и их изменения с температурой.

Вольтфарадная характеристика р-п перехода

Экспериментальное исследование зависимости барьерной емкости р-п перехода диода от обратного смещения $C(U)$ дает возможность определить контактную разность потенциалов, толщину, максимальное электрическое поле E , а также установить однородность распределения примесей в области р-п перехода. Из уравнения для барьерной емкости резкого р-п перехода можно получить, что

$$\left(\frac{S}{C_\delta}\right)^2 = \frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0q} \cdot \frac{1(\varphi_k - u)}{N^*} \quad (1)$$

$$\text{где } N^* = \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \quad (2)$$

Отсюда видно, что зависимость величины от U является линейной, т.е. для резкого р-п – перехода вольтфарадная характеристика в координатах от U – прямая (рис. 1).

Из соотношения (1) и рис. 1. следует, что при $U = U = |\varphi_k|$ величина $(S/C_\delta)^2 = 0$, т.е. контактная разность потенциалов р-п – перехода равна абсолютному значению напряжения, соответствующему точке пересечения прямой с осью U .

$$\frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0q} \cdot \frac{1}{N^*} = \frac{\Delta(S/C_\delta)^2}{\Delta U} \quad (3)$$

Из исходной формулы барьерной емкости плоского р-п перехода (1) следует, что:

$$\left(\frac{\delta}{\varepsilon\varepsilon_0}\right)^2 = \left(\frac{S}{C_\delta}\right)^2 \quad (4)$$

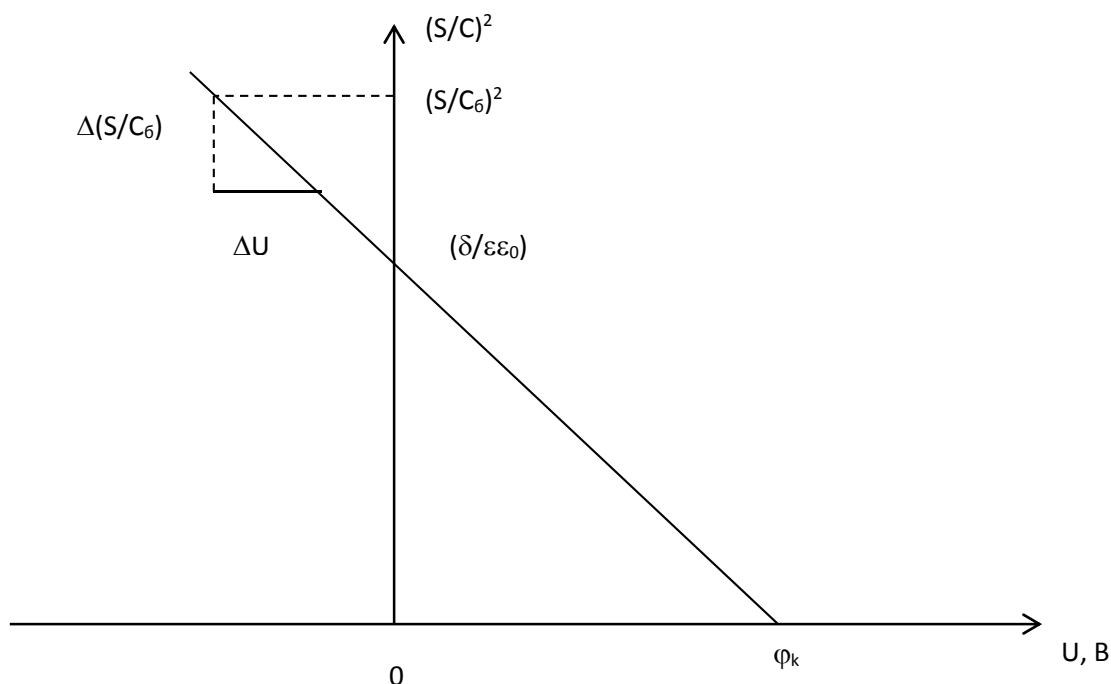


Рис. 1. Зависимость барьерной емкости резкого р-п перехода от напряжения

Таким образом, величина $(\delta/\epsilon\epsilon_0)^2$ в состоянии равновесия р-п – перехода, т.е. при $U=0$, равна значению $(S/C_0)^2$, соответствующему точке пересечения прямой с осью $(S/C_0)^2$.

Максимальное электрическое поле E связано с контактной разностью потенциалов и толщиной области объемного заряда уравнением:

$$E_m = \frac{2\varphi_k}{\delta} \quad (5)$$

Дифференциальное сопротивление и эквивалентная схема диода на переменном токе

В случае, дифференциальная проводимость имеет вид:

$$g = \frac{dI}{dU} = \frac{C}{R}; \quad I_{\text{пос}} = \exp \frac{g}{RT} \cdot U = \frac{g}{RT} (I + I_{\text{пос}}) = \frac{1}{r} \quad (6)$$

$$g = \alpha I, \text{ где } \alpha = \frac{g}{RT}; \quad g = \frac{e}{KT} I = \alpha I \quad (7)$$

Таким образом, зависимость проводимости от тока при различных температурах имеет вид семейства прямых $g(I)$. Наклон прямых $g(I)$ определяется величиной $\alpha=q/RT$, а пересечение их с осью абсцисс – величиной I_n .

В реальных диодах последовательно с р-п – переходом оказывается включенным сопротивление толщи полупроводника и контактов R_s .

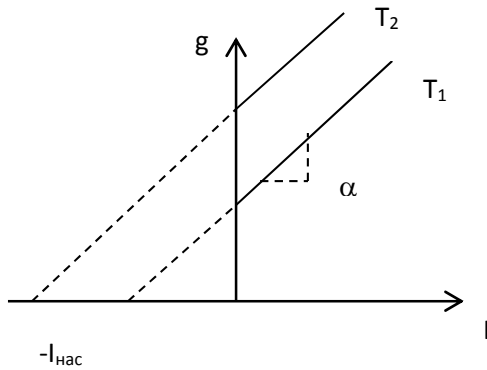


Рис. 2 Зависимость дифференциальной проводимости диода от величины тока.

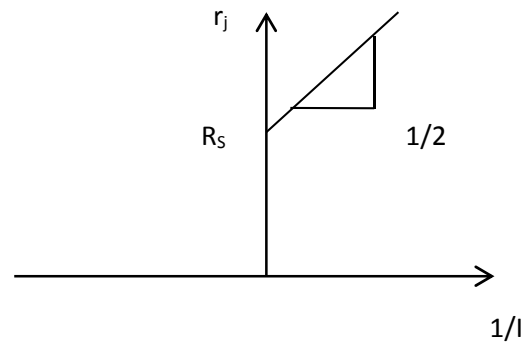


Рис. 3 Зависимость дифференциального сопротивления от обратного тока.

Поскольку при увеличении тока дифференциальное сопротивление р-п перехода падает, то последовательное сопротивление диода может стать существенным в полном сопротивлении диода.

$$r_j = R_s + \frac{1}{g} \quad (8)$$

В соответствии с этой формулой величину R_s можно определить из $r_j(1/I)$ зависимости экстраполяцией значений полного дифференциального сопротивления диода в области больших токов (рис. 3)

При обратных напряжениях на диоде и большой частоте переменного тока основную роль в комплексном сопротивлении играет зарядная емкость

диода, при положительных смещениях – сопротивления r и R_s , последние из которых существенно при больших токах (рис. 4).

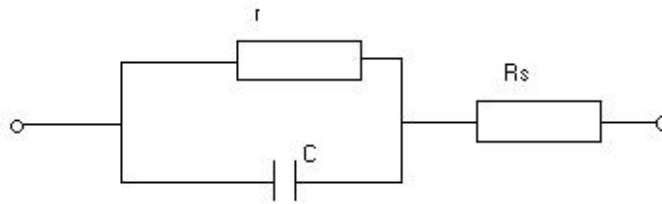


Рис. 4 Эквивалентная схема диода на переменном токе.

Вольт-амперная характеристика диода

В реальных диодах падение напряжения на р-п – переходе отличается от полного напряжения на диоде V :

$$V = U + IR_s \quad (9)$$

С учетом этого, получаем:

$$I_N = I_N \left\{ \exp \left[\frac{g(U - IR_s)}{RT} \right] - 1 \right\} \quad (10)$$

Если $IR > U$, то из вольт- амперной характеристики можно определить R и контактную разность потенциалов (рис. 5).

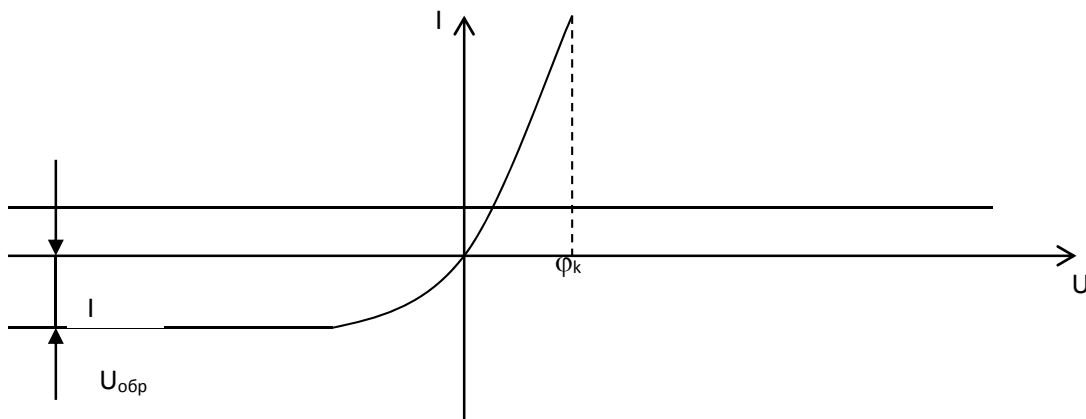


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика р-п – перехода.

Порядок выполнения работы

Задание 1.

Исследование дифференциальной емкости р-n – перехода при комнатной температуре.

1. Снять вольтфарадную характеристику диода в обратной ветви. Измерение проводить в диапазоне напряжений от -8.0 до +0.5 (около 20 точек) измерение проводить 3 раза, проходя те же точки. Результаты записывать в таблицу №1, состоящую из пяти столбцов:

Таблица 1

U	C ₁	C ₂	C ₃	C _{ср}

2. Измерить под микроскопом площадь р- n – перехода аналогичного образца диода со вскрытым корпусом (S=1мм²).

Обработка результатов

1. Рассчитать для каждой точки величину C_{ср} и результат занести в таблицу 1.
2. Построить график зависимости $(C/S_0)^2$ от напряжения U, исходя из полученных результатов, в интервале от -8.0 до +0.5 В. Сделать вывод о распределении примесей в области р-n – перехода.

3. Определить по графику значения величин $\frac{2}{\epsilon\epsilon_0 g N^*} \cdot \left(\frac{\delta}{\epsilon\epsilon_0}\right)^2$ вычислить приведенную концентрацию N* и толщину области объемного заряда в диоде.

4. Используя экспериментальные точки в области смещения $-1.0 < U \ll + 0.5$ В, определить величину φ_k . Сравнить ее с точкой пересечения

экстраполированной прямой с осью абсцисс. Вычислить величину E_{\max} при $U = 0$ по формуле (5).

5. Из значения N^* вычислить N_a и N_d , предположив, что $N_d / N_a = 0.1$ по формуле (2)

Задание 2.

1. Включить блок питания Б5-49 и вольтметр В7-35.
2. Поставить переключатель на макете в режим диода прямого и, изменяя на блоке питания напряжение от 0.1 В до 0.9 В снять ВАХ диода при прямом смещении.
3. поставить переключатель на макете в режим диода обратного и, изменяя на блоке питания напряжение от 1 В до 9 В, снять ВАХ диода при обратном смещении.
4. Построить ВАХ.

Вопросы и задания для подготовки

1. Что называют ВАХ диода. Приведите теоретическую и экспериментальную ВАХ диода.
2. Как определить дифференциальное сопротивление (дифференциальную проводимость) диода по его ВАХ.
3. Что называют током насыщения в п/п диоде?
4. Что такое пробивное напряжение диода?
5. Что такое барьерная емкость диода и как меняется её величина с изменением приложенного напряжения? То же о диффузионной емкости.
6. Как экспериментально определить контактную разность потенциалов, толщину объединенного слоя и установить однородность распределения примесей в области р-п перехода?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВАХ И ПАРАМЕТРОВ ДИОДОВ

Цель работы: ознакомление с основными параметрами и характеристиками полупроводниковых диодов.

Общие сведения

Полупроводниковым диодом называют электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими $p-n$ -переходами и двумя выводами.

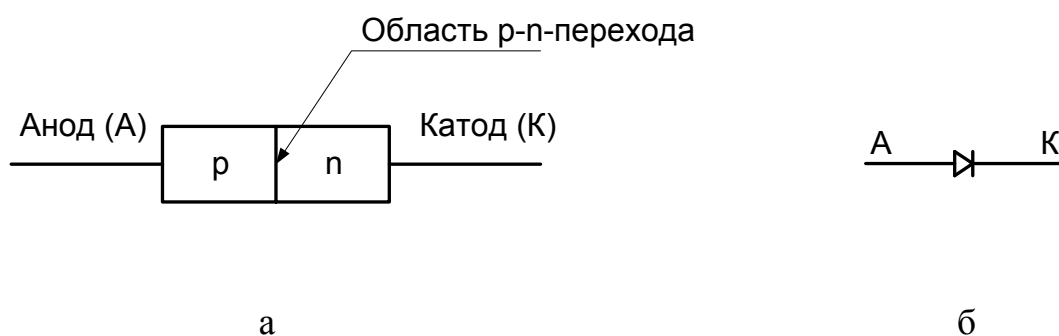


Рис. 1. Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены

Буквами p и n обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно p -типа и n -типа. Обычно концентрации основных носителей заряда (дырок в слое p и электронов в слое n) сильно различаются. Одна из областей $p-n$ -структуры, называемая эмиттером, имеет большую концентрацию основных носителей заряда, чем другая область, называемая базой.

В зависимости от основного назначения и вида используемого явления в $p-n$ -переходе различают шесть основных функциональных типов электропреобразовательных полупроводниковых диодов: выпрямительные, высокочастотные, импульсные, туннельные, стабилитроны, варикапы.

Каждый тип диода содержит ряд типонаименований, регламентированных соответствующим ГОСТом.

На рис. 2 представлены структуры планарно-эпитаксиального (а) и сплавного (б) диодов. База и эмиттер образуют омические переходы (контакт) с электродами. К электродам подсоединены металлические выводы, посредством которых диод включается в цепь.

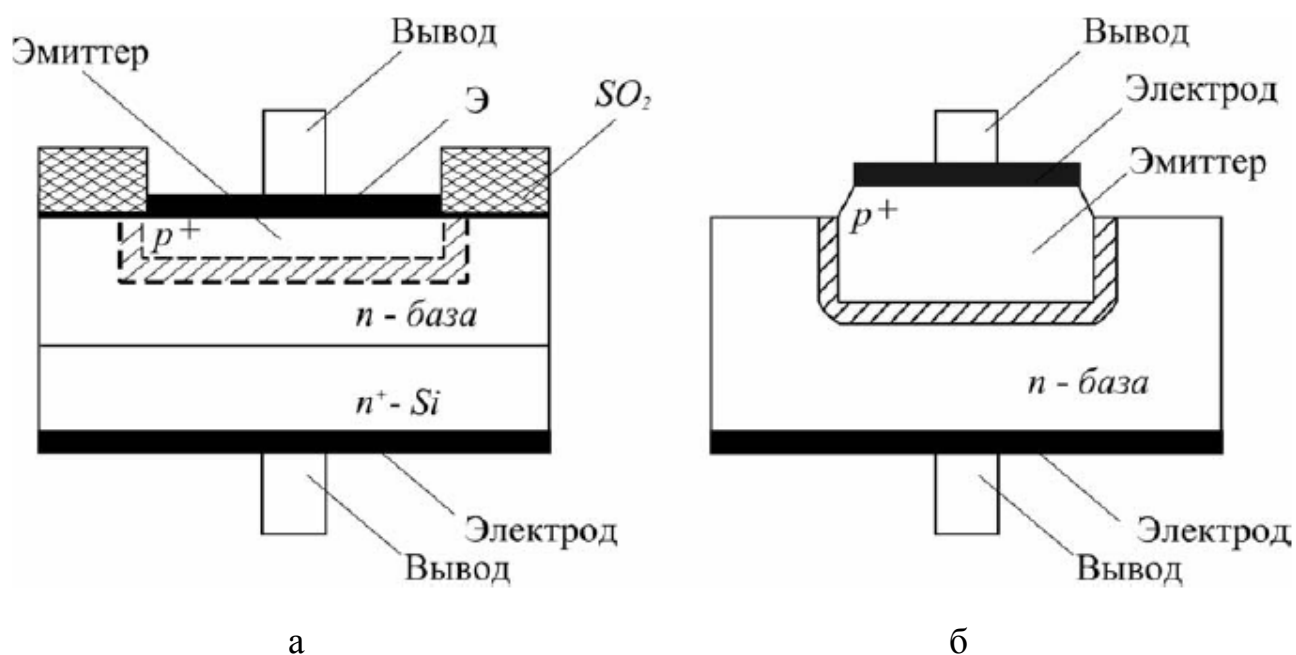


Рис. 2. Структуры планарно-эпитаксиального (а) и сплавного (б) диодов

Основной характеристикой полупроводниковых диодов служит вольт-амперная характеристика. В отличие от характеристики идеального p - n -перехода (пунктирная кривая на рис. 3, а), характеристика реального диода (сплошная кривая на рис. 3, а) в области прямых напряжений U располагается несколько ниже из-за падения части приложенного напряжения на объёмном сопротивлении базы диода r .

Уравнение вольт-амперной характеристики имеет вид:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{U}{\phi_T} \right) - 1 \right],$$

где U - напряжение на p - n -переходе; I_0 - обратный (или тепловой) ток, ϕ_T - температурный потенциал электрона.

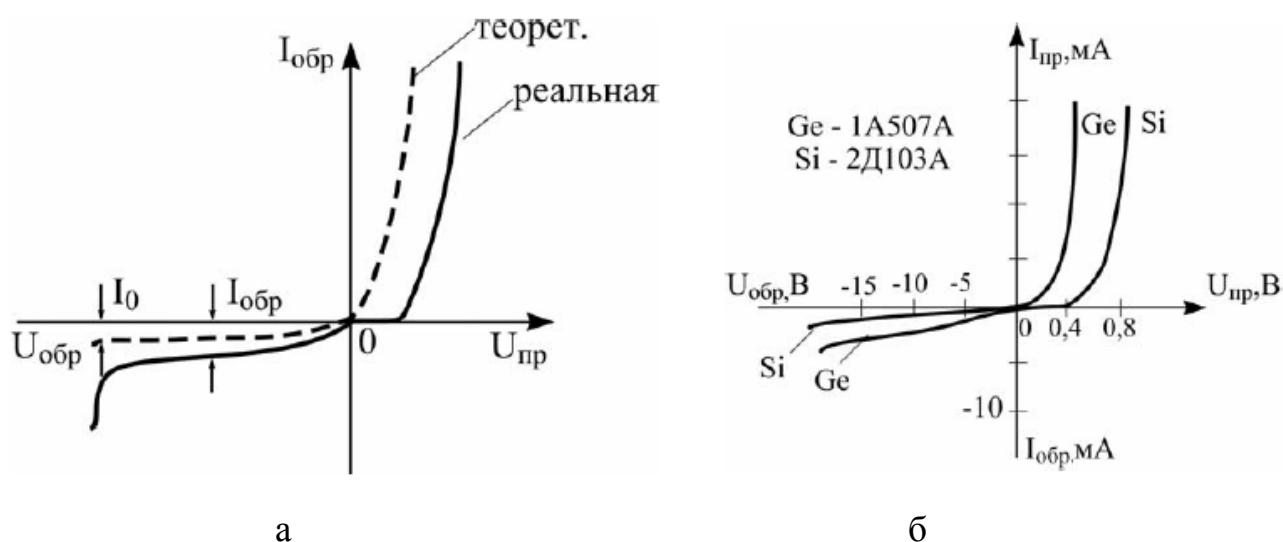


Рис. 3

В области обратных напряжений можно пренебречь падением напряжения в объёме полупроводника. При достижении обратным напряжением определённого критического значения ток диода начинает резко возрастать. Это явление называют пробоем диода.

Различают два основных вида пробоя электронно-дырочного перехода: электрический и тепловой. В обоих случаях резкий рост тока связан с увеличением числа носителей заряда в переходе. Электрический пробой бывает двух видов - лавинный и туннельный.

Полупроводниковые диоды отличаются друг от друга материалом полупроводника. Наиболее часто в них используют германий или кремний. Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого диодов представлены на рис. 3,б. При повышении температуры абсолютная

величина изменения обратного тока в кремниевом диоде (рис. 4,а) значительно меньше, чем в германиевом (рис. 4,б).

Выпрямительные диоды используют для выпрямления переменных токов частотой 50 Гц – 100 кГц. В них используется главное свойство *p-n*-перехода – односторонняя проводимость. Главная особенность выпрямительных диодов – большие площади *p-n*-перехода, поскольку они рассчитаны на выпрямление больших по величине токов. Основные параметры выпрямительных диодов даются применительно к их работе в однополупериодном выпрямителе с активной нагрузкой (без конденсатора, сглаживающего пульсации).

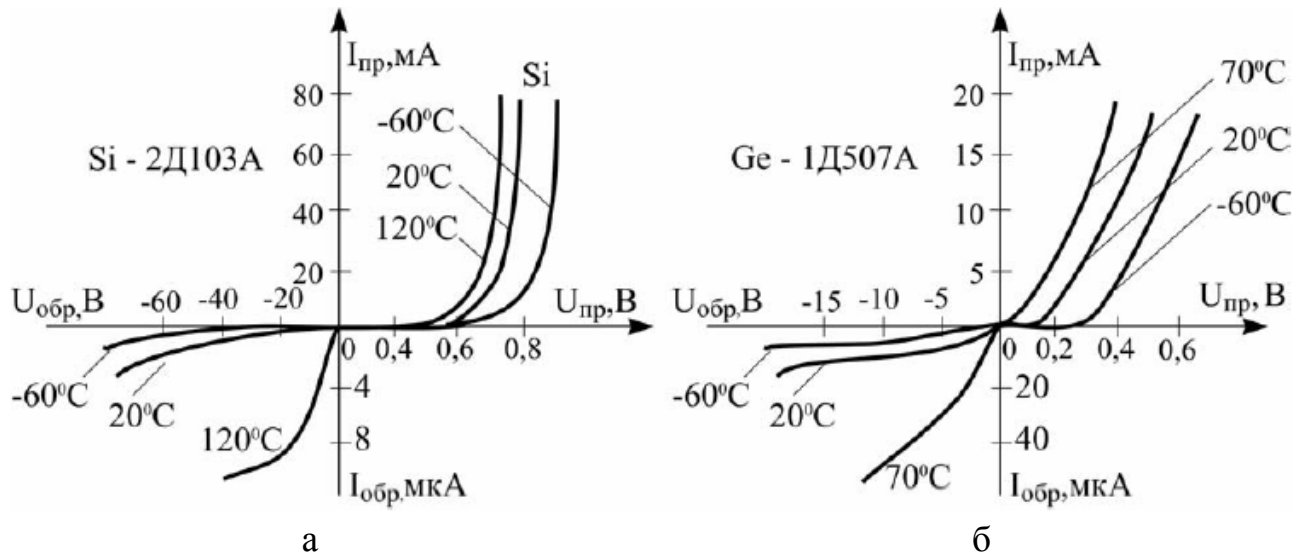


Рис. 4

Среднее прямое напряжение $U_{пр.ср}$ — среднее за период прямое напряжение на диоде при протекании через него максимально допустимого выпрямленного тока.

Средний обратный ток $I_{обр.ср}$ — средний за период обратный ток, измеряемый при максимальном обратном напряжении.

Максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр. max}$ ($U_{обр. u max}$) — наибольшее постоянное (или импульсное) обратное напряжение, при котором диод может длительно и надежно работать.

Максимально допустимый выпрямленный ток $I_{вн. ср max}$ — средний за период ток через диод (постоянная составляющая), при котором обеспечивается его надежная длительная работа.

Превышение максимально допустимых величин ведет к резкому сокращению срока службы или пробоем диода.

Максимальная частота f_{max} — наибольшая частота подводимого напряжения, при которой выпрямитель на данном диоде работает достаточно эффективно, а нагрев диода не превышает допустимой величины.

В выпрямительном устройстве энергия переменного тока преобразуется в энергию постоянного тока за счет односторонней проводимости диодов.

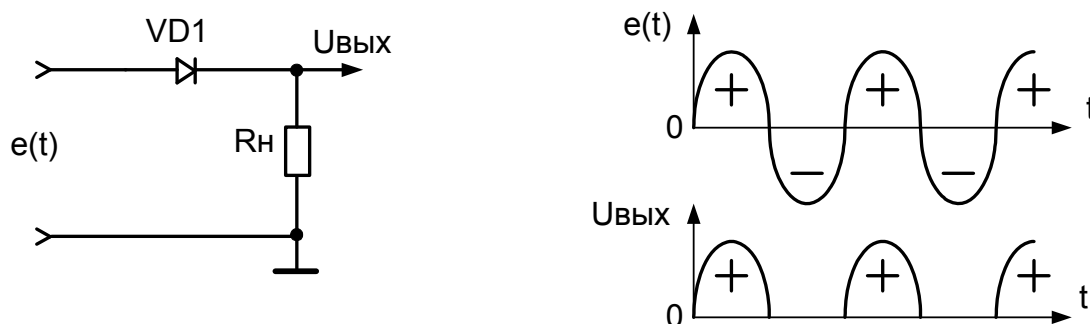


Рис.5

На рис. 5 приведена схема однополупериодного выпрямителя. Работа выпрямителя происходит следующим образом. Если генератор вырабатывает синусоидальное напряжение,

$$e(t) = E_m \sin \omega t,$$

то в течение положительного (+) полупериода напряжение для диода является прямым, его сопротивление мало, и через резистор проходит ток, который создает на резисторе R_H падение напряжения $U_{вых}$, повторяющее входное напряжение $e(t)$. В следующий, отрицательный (-) полупериод, напряжение для диода является обратным, сопротивление диода велико, тока практически нет и, следовательно, $U_{вых} = 0$. Таким образом, через диод и R_H протекает пульсирующий выпрямленный ток. Он создает на резисторе R_H пульсирующее выпрямленное напряжение $U_{вых}$.

Полезной частью выпрямленного напряжения является его постоянная составляющая или среднее значение U_{cp} (за полупериод):

$$U_{cp} = U_{max} / \pi = 0,318 U_{max}$$

Таким образом, U_{cp} составляет около 30% от максимального значения.

Выпрямленное напряжение обычно используется в качестве напряжения питания электронных схем.

Высокочастотные (универсальные) и **импульсные диоды** применяют для выпрямления токов, модуляции и детектирования сигналов с частотами до нескольких сотен мегагерц. Импульсные диоды используют в качестве ключевых элементов в устройствах с микросекундной и наносекундной длительностью импульсов. Их основные параметры:

Максимально допустимые обратные напряжения $U_{обр. max}$ ($U_{обр. и max}$) – постоянные (импульсные) обратные напряжения, превышение которых приводит к его немедленному повреждению.

Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ – падение напряжения на диоде при протекании через него постоянного прямого тока $I_{пр}$ – заданного ТУ.

Постоянный обратный ток $I_{обр}$ — ток через диод при постоянном обратном напряжении ($U_{обр. max}$). Чем меньше $I_{обр}$, тем качественнее диод.

Емкость диода C_d — емкость между выводами при заданном напряжении. При увеличении обратного напряжения (по модулю) емкость C_d уменьшается.

При коротких импульсах необходимо учитывать инерционность процессов включения и выключения диода, что характеризуется следующими параметрами.

1) Время установления прямого напряжения на диоде ($t_{уст}$) – время, за которое напряжение на диоде при включении прямого тока достигает своего стационарного значения с заданной точностью (рис. 6,а).

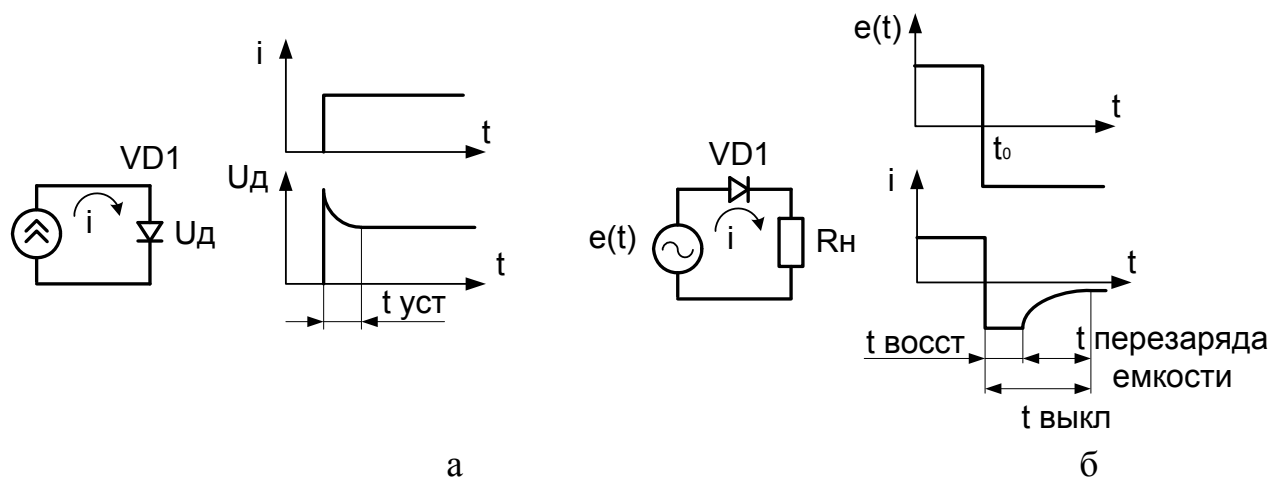


Рис. 6

Это время связано со скоростью диффузии и состоит в уменьшении сопротивления области базы за счёт накопления в ней неосновных носителей заряда, инжектируемых эмиттером. Первоначально оно высоко, т.к. мала концентрация носителей заряда. После подачи прямого напряжения концентрация неосновных носителей заряда в базе увеличивается, это снижает прямое сопротивление диода.

2) Время восстановления обратного сопротивления диода ($t_{\text{восст.}}$) определяется как время, в течение которого обратный ток диода после переключения полярности приложенного напряжения с прямого на обратное достигает своего стационарного значения с заданной точностью (рис. 6, б), обычно 10% от максимального обратного тока. Это время связано с рассасыванием в базе неосновных носителей заряда, накопленных при протекании прямого тока. Оно состоит из двух составляющих $t_{\text{восст.}} = t_1 + t_2$, где t_1 – время рассасывания, за которое концентрация неосновных носителей заряда на границе p - n -перехода обращается в ноль; t_2 – время разряда диффузионной емкости, связанное рассасыванием неосновных зарядов в объеме базы диода. В целом время восстановления это время выключения диода.

Там, где требуется малое время переключения, используют **диоды Шотки**. Они имеют переход металл — полупроводник, который обладает выпрямительным эффектом. Накопление заряда в переходе этого типа

выражено слабо. Поэтому время переключения может быть уменьшено до значения порядка 100 пс. Другой особенностью этих диодов является малое (по сравнению с обычными кремниевыми диодами) прямое напряжение, составляющее около 0,3 В.

Задание

Расчетная часть

1. Рассчитать вольт-амперную характеристику (ВАХ) выпрямительного диода $I=f(U)$ при температуре окружающей среды $+20^{\circ}\text{C}$ и $+40^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $U=0\dots300\text{мВ}$ (не менее 5 точек).

Ток диода при прямом напряжении U : $I = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1)$,

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11600}, \quad T = 273 + t^{\circ}\text{C}, \quad U \approx \varphi_T \ln \frac{I}{I_0},$$

где I_0 - обратный ток диода, φ_T - температурный потенциал электрона, k - постоянная Больцмана, q - заряд электрона.

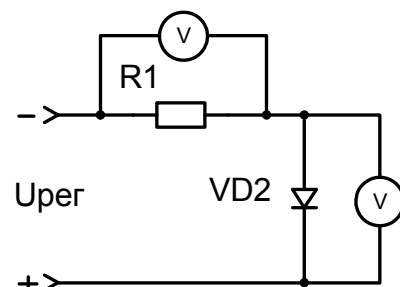
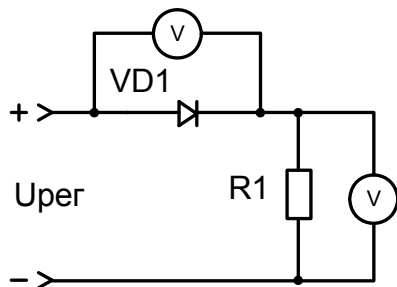
2. Определить дифференциальное сопротивление и сопротивление диода постоянному току в начале линейного участка ВАХ при температуре окружающей среды $+20^{\circ}\text{C}$ и $+40^{\circ}\text{C}$ соответственно.

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\varphi_T T}{I + I_0}, \quad R_0 = \frac{U}{I}.$$

Исходные данные к расчету

Выпрямительный диод Д223А, $I_{\text{макс}}=50\text{мА}$, $I_0=1\text{мкА}$ ($t^{\circ}\text{C}=20^{\circ}\text{C}$).

Экспериментальная часть



а

б

Рис.7

1. Исследовать полупроводниковые выпрямительные диоды VD1, VD2 рис. 7,а,б:

- снять вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов VD1, VD2 $I=f(U)$, $R_1 = 1\text{кОм}$ (не менее 10 точек);
- результаты оформить в виде таблиц 1, 2 и графиков.

Таблица 1

Прямая ветвь	U_{VD1} [В]										
	U_{R1} [В]										
	I_{VD1} [mA]										
Обратная ветвь	U_{VD1} [В]										
	U_{R1} [В]										
	I_{VD1} [mA]										

Таблица 2

Прямая ветвь	U_{VD2} [В]										
	U_{R1} [В]										
	I_{VD2} [mA]										

Обратная ветвь	U_{VD2} [В]										
	U_{R1} [В]										
	I_{VD2} [mA]										

- по результатам определить типы используемых выпрямительных диодов (кремниевый или германиевый);
- определить значение емкостей диодов $C_{\partial 1}$, $C_{\partial 2}$ при обратном напряжении $U_{обр}=4В$.

2. Исследовать схему однополупериодного выпрямителя рис. 7,а:

- зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе выпрямителя при подаче на вход синусоидального колебания заданной амплитуды и частоты;
- зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе выпрямителя при подаче на вход колебания типа “меандр” заданной амплитуды и частоты.

3. Исследовать схему диодного амплитудного ограничителя рис. 7,б:

- зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе амплитудного ограничителя при подаче на вход синусоидального колебания заданной амплитуды и частоты;
- зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе амплитудного ограничителя при подаче на вход колебания типа “меандр” заданной амплитуды и частоты;
- по результатам определить порог ограничения для данного амплитудного ограничителя рис. 7,б.

Описание лабораторной установки

Принципиальная схема макета, представленная на рис. 7, позволяет изучить основные свойства кремниевого и германиевого полупроводниковых

диодов. Для снятия прямой и обратной ВАХ диодов на схемы подается регулируемое напряжение $U_{рег}$ соответствующей полярности. Схема на рис.7,а позволяет изучить принцип работы однополупериодного выпрямителя. Схема рис.7,б позволяет исследовать амплитудный диодный ограничитель.

Указания по выполнению работы

1. Для снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов VD1, VD2 необходимо использовать регулируемый стабилизированный источник питания 0-15В, напряжение с которого подключается к клеммам “Uрег” на лабораторном стенде с соответствующей полярностью. Для снятия прямой ветви ВАХ на анод диода подается положительное напряжение Uрег (прямое включение диода). Для снятия обратной ветви ВАХ на анод подается отрицательное напряжение Uрег (обратное включение диода). Изменяя напряжение Uрег с источника питания от нуля до 15В, вольтметром постоянного тока или универсальным вольтметром фиксируют напряжения на диоде и резисторе R1, данные заносятся в таблицу. Значение тока рассчитывается по закону Ома.

Для определения значений емкостей диодов $C_{\partial 1}$, $C_{\partial 2}$ на схемы рис. 7,а,б подают синусоидальное колебание амплитудой $U_{вх}=4В$ частотой $f=0,3МГц$. Обратное для диода напряжение, в данном случае отрицательная полуволна, используется для определения реактивного сопротивления емкости диода на заданной частоте. Схема замещения цепей рис. 7, а, б на высокой частоте для обратного напряжения представляет собой резистивно-емкостной делитель, что позволяет приближенно оценить значения емкостей диодов $C_{\partial 1}$, $C_{\partial 2}$:

$$C_{\partial 1} = \frac{U_{R1}}{2\pi f R1 (U_{вх} - U_{R1})}, \quad C_{\partial 2} = \frac{U_{вх} - U_{VD2}}{2\pi f R1 U_{VD2}},$$

где $U_{вх}$ – амплитуда входного напряжения, U_{R1} – значение обратного напряжения (отрицательной полуволны) на резисторе R1, U_{VD2} – значение обратного напряжения на диоде VD2.

Значения $U_{вх}$, U_{R1} , U_{VD2} определяют с помощью осциллографа.

2. Для исследования схемы однополупериодного выпрямителя на схему рис.7,а последовательно подают синусоидальное колебание и колебание типа “меандр” с генератора низкой частоты. При этом выход генератора подключается к клеммам “Uрег” лабораторного стенда. Значение амплитуд и частот сигналов указывается преподавателем. С помощью осциллографа зарисовать сигналы на входе и выходе однополупериодного выпрямителя.

3. Для исследования схемы диодного амплитудного ограничителя на схему рис.7,б последовательно подают синусоидальное колебание и колебание типа “меандр” с генератора низкой частоты. При этом выход генератора подключается к клеммам “Uрег” лабораторного стенда. Значение амплитуд и частот сигналов указывается преподавателем. С помощью осциллографа зарисовать сигналы на входе и выходе амплитудного ограничителя. По результатам определить порог ограничения амплитудного ограничителя.

Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Исходные данные для расчета.
3. Предварительный расчет.
4. Принципиальную схему лабораторной установки.
5. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
6. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета.
7. Краткие выводы по результатам расчета и эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Пояснить как образуется p - n -переход.
2. Свойства p - n -перехода, потенциальный барьер.
3. Какой из выводов полупроводникового диода называют базой, а какой эмиттером и почему?
4. Виды полупроводниковых диодов, назначение, область применения, основные параметры и характеристики.
5. В чем особенность диодов Шотки, их достоинства и область применения.
6. В чем отличие идеальной ВАХ полупроводникового диода от реальной?
7. Сравнить ВАХ германиевого и кремниевого полупроводникового диода, сопоставить с полученными экспериментальными данными.
8. Сравнить по температурным свойствам кремниевый и германиевый полупроводниковые диоды.
9. Что называют прямым включением диода?
10. Какой ток протекает через диод при его обратном включении и чем он вызван?
11. Какое явление называется пробоем диода? Виды пробоя.
12. Что называют дифференциальным сопротивлением диода?
13. Пояснить как в лабораторной работе экспериментально снимались ВАХ диодов?
14. Нарисовать принципиальную схему однополупериодного выпрямителя отрицательного напряжения и осциллограммы сигнала на его входе и выходе.
15. Нарисовать принципиальную схему амплитудного диодного ограничителя, исследовавшегося в работе, и осциллограммы сигнала на его входе и выходе, пояснить принцип действия.
16. Чем обусловлен порог ограничения амплитудного диодного ограничителя?
17. Чем обусловлены инерционные свойства полупроводниковых диодов?

18. Какие параметры характеризуют инерционность полупроводниковых диодов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ

Цель работы: изучение переходных процессов в диоде, определение времени жизни неосновных носителей тока базы диода, сопротивления базы и контактной разности потенциалов.

Обычно во многих схемах р-п-переход работает под переменным напряжением в импульсном режиме. В этом случае оказываются инерционные процессы в р-п-переходе, то есть при переключении диода из одного состояния (прямое направление) в другое состояние (обратное направление), стационарное состояние в структуре устанавливается не сразу, а со временем. Этот процесс называется переходным процессом. Переходные процессы в диоде зависят от характера изменения режима работы диода; переходные процессы, связанные с включением диода в прямом направлении (обратном); процессы, связанные с переключением диода из прямого направления в нейтральное (выключение диода).

Переходные процессы в полупроводниковых диодах связаны в основном с двумя явлениями, происходящими при быстром изменении напряжения на диоде или тока через диод.

а) Накопление неосновных носителей в базе диода при его прямом включении, их рассасывание при уменьшении напряжения. Этот процесс вызывает изменение сопротивления базы диода и называется модуляцией сопротивления базы диода.

б) Второе явление, происходящее в диодах при их переключении, связано с зарядкой и разрядкой барьерной емкости, на что требуется определенное время.

При сравнительно больших плотностях прямого тока через диод существенно накопление неосновных носителей в базе диода, а барьерной емкостью можно пренебречь. При малых плотностях тока переходные процессы в диоде определяются зарядом и разрядом барьерной емкости диода, а накоплением и рассасыванием неосновных носителей зарядов в базе можно пренебречь.

Переходные процессы в полупроводниковом диоде зависят также от сопротивления внешней цепи, в которую включен диод. Таким образом, переходные процессы в полупроводниковом диоде зависят от плотности тока через диод и величины внешнего сопротивления.

Рассмотрим переходные процессы в полупроводниковом диоде при различных режимах его работы.

1. Переключение диода из прямого направления в обратное

Анализ переходных процессов в диоде проводится при следующих предположениях:

- а) р-n-переход резкий и несимметричный $N_d \gg N_a$;
- б) емкость запорного слоя не влияет на переходной процесс;
- в) в полупроводнике сохраняется электронейтральность как во время переходных, так и во время стационарных процессов;
- г) уровень инжекции мал и время жизни носителей постоянно и не зависит от уровня инжекции;
- д) генерация и рекомбинация в запорном слое отсутствуют;
- е) ширина базы диода $W \gg L_p$ - диффузной длины.

Рассмотрим случай переключения диода из прямого направления в обратное, когда внешнее сопротивление цепи мало. Качественно процессы,

происходящие в диоде в этом случае можно объяснить следующим образом. При прохождении прямого тока через диод в области базы (в данном случае прямой ток создается путем инъекции дырок в n-область и эта область является базой) происходит накопление инжектируемых неосновных носителей заряда и для обеспечения электронейтральности в базе около p-n-перехода накапливаются и электроны, поэтому сопротивление базы уменьшается как из-за увеличения концентрации дырок, так и из-за увеличения концентрации электронов. При переключении диода с прямого на обратное начинается процесс рассасывания неосновных носителей, накопленных в базе. Из-за ограничения обратного тока концентрация дырок в базе около p-n-перехода не может мгновенно уменьшиться до равновесного значения. Пока концентрация дырок в базе около p-n-перехода превышает равновесное значение, на p-n-переходе сохраняется прямое падение напряжения.

После уменьшения концентрации дырок в базе около p-n-перехода до нуля величина обратного тока начинает уменьшаться со временем. С течением времени все накопленные в базе дырки уходят через p-n-переход или рекомбинируют в базе ввода, в результате чего обратный ток уменьшается до стационарного значения тока насыщения. В это время заканчивается восстановление обратного сопротивления.

Процесс рассасывания накопленных носителей происходит значительно медленнее процесса их накопления, поэтому именно процесс рассасывания и определяет частотные свойства большинства диодов.

Влияние плотности тока в этом случае сводится к тому, что при увеличении плотности прямого тока увеличивается концентрация инжектированных дырок в n-области. Влияние малого внешнего сопротивления сводится к тому, что ток через p-n-переход как в прямом, так и в обратном направлениях определяется только сопротивлением p-n-перехода. Поэтому в начальный момент при переключении диода из прямого

направления на обратное наблюдается резкое увеличение обратного тока, так как в этот момент сопротивление р-п-перехода мало.

Для того, чтобы закон изменения тока через диод и напряжение на р-п-переходе со временем, необходимо найти закон распределения инжектируемых дырок в п-области. Распределение дырок в базе при протекании прямого тока через р-п-переход имеет вид

$$p_n = p_{n0} + (p_{n1} - p_{n0})e^{-x/L_p} \quad (1)$$

где p_{n1} - концентрация дырок у перехода при прямом смещении.

Распределение дырок при обратном смещении, после окончания переходного процесса, описывается уравнением:

$$p_n = p_{n0} \left(1 - e^{-x/L_p} \right) \quad (2)$$

При переключении с прямого направления на обратное в начальный момент концентрация дырок вблизи запирающего слоя становится равной нулю, т.е. $p_n=0$ при $x=0, t>0$.

При выше сделанных предположениях уравнение непрерывности имеет вид:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (4)$$

Уравнение (1.4) с учетом (1.1) - (1.3) решается относительно концентрации дырок и если в конечном результате положить, что ток через переход:

$$I = -\ell D_p \left(\frac{\partial p_n}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (5)$$

и считать, что ток насыщения I_s пренебрежимо мал, то закон изменения обратного тока от времени будет иметь вид:

$$\frac{I}{I_{np}} = - \left[\frac{\ell^{-Q}}{(\Pi Q)^{1/2}} - \ell \tau c \sqrt{Q} \right] \quad (6)$$

где I_{np} - прямой ток диода; $Q = t/t_p$ - относительное время.. Разложение уравнения (1.6) в предельных случаях дает

$$\frac{I}{I_{np}} \approx - \frac{1}{(\Pi Q)^{1/2}}, Q \ll 1 \quad (7)$$

$$\frac{I}{I_{np}} \approx \frac{\ell^{-Q}}{2\Pi^{1/2} Q^{3/2}}, Q \gg 1 \quad (8)$$

Из (1.6) следует, что при $t=0$, $I/I_{np} = \infty$ - это означает, что при малом внешнем сопротивлении в начальный момент переключения обратный ток должен быть большим, но ограниченным из-за конечного сопротивления цепи.

На рис. 1, а, б, в, г, д представлены, последовательное изменение концентрации дырок в базе диода (а), временные диаграммы импульса ЭДС (б), тока диода (в), напряжение на базе диода (г), напряжение в р-п-переходе (д) при переключении диода из прямого на обратное напряжение при малом внешнем сопротивлении.

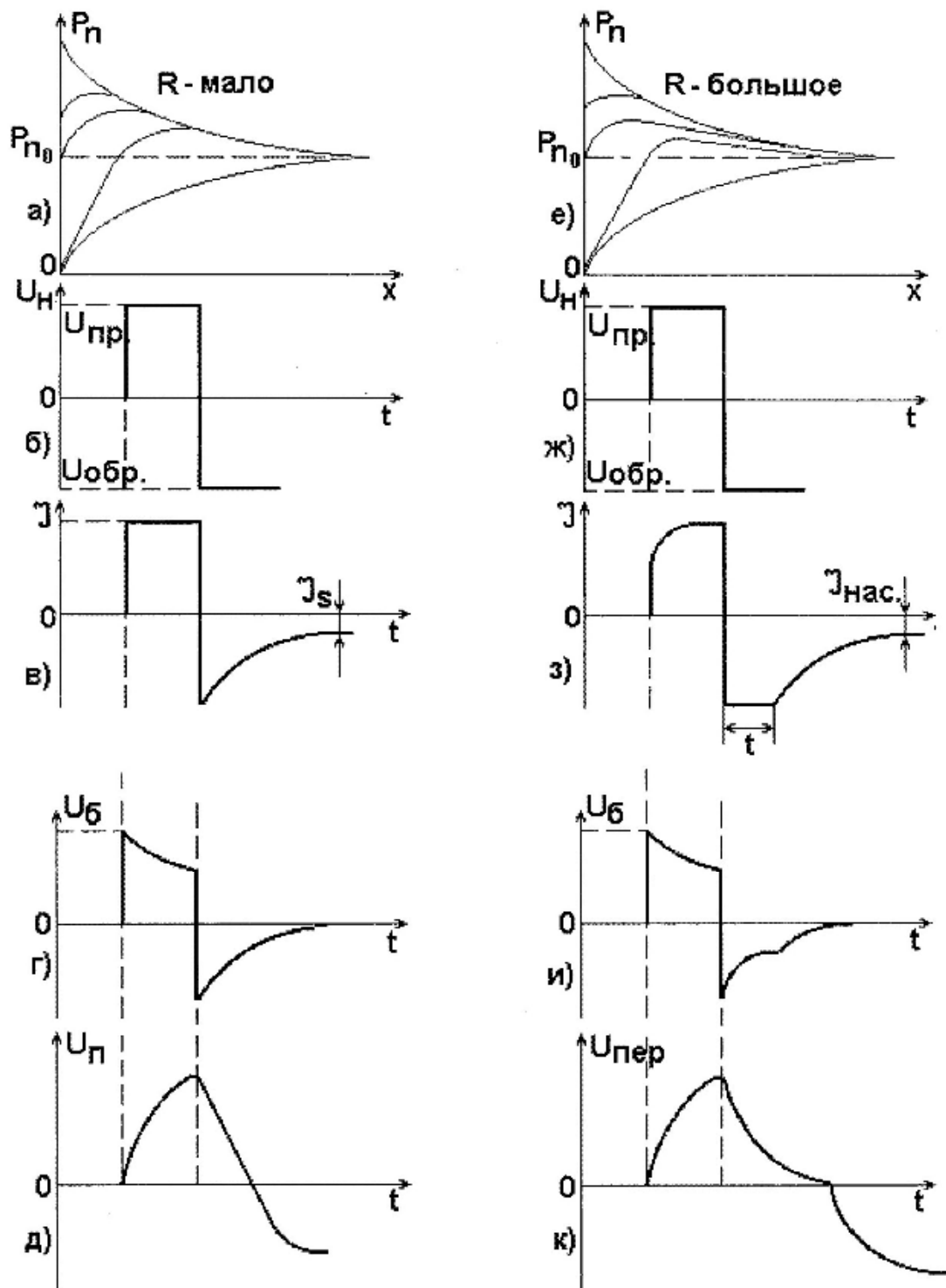


Рис.1. Распределение концентрации дырок в базе диода при мгновенном изменении прямого напряжения на обратное, когда R мало (а) и когда R большое (е); временные диаграммы импульса ЭДС (б и ж); точки диода когда R мало (в) и когда R большое (з, ж) напряжение на базе диода когда R мало (г) и когда R большое (и); и напряжение на р-п – переходе когда R мало (д) и когда R большое (к)

Рассмотрим случай переключения диода из прямого направления в обратное, когда сопротивление цепи велико. В этом случае ток цепи диода определяется внешним сопротивлением R .

При наличии прямого смещения на диоде и в стационарном состоянии в базе диода накоплено определенное количество неосновных носителей, величины напряжений на базе диода, на диоде и на р-п-переходе достигают установившихся значений.

При подаче импульса обратного напряжения в цепи, некоторое время будет протекать неизменный по величине ток $U_{обр}R$, амплитуда и длительность которого определяется величиной обратного импульса и сопротивлением.

Основной задачей при анализе переходного процесса в рассматриваемом случае является выяснение, от чего зависит продолжительность постоянства обратного тока в момент переключения напряжения с прямого на обратное. Эту задачу решают следующим образом, ток через р-п-переход является диффузионным и дырочным, т.е.

$$I_p = I = -\ell D_p \left(\frac{\partial p_n}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (9)$$

Из (1.9) следует, что на некотором участке переходного процесса I_p остается постоянным, а, следовательно, на этом участке и градиент концентрации дырок $\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{x=0}$ также будет оставаться постоянным.. Решение уравнения (4) описывает поведение концентрации дырок в базе на участке переходного процесса, где $\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{x=0}$ остается постоянным:

$$p_n = p_{n1} \left\{ \ell^{-x} - \frac{I_{np} + I_{об}}{2I_{np}} \left[\ell^{-x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Q}} - \sqrt{Q} \right) \ell^x \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Q}} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

где $x = \frac{x}{L_p}$ - относительная координата.

При $x=0$ формула (1.10) примет вид:

$$p_n|_{x=0} = p_{n1} \left\{ 1 + \frac{I_{np} + I_{o\delta}}{I_{np}} \operatorname{erfc} \sqrt{Q} \right\} \quad (11)$$

В некоторый момент времени $Q = Q' = \frac{t_1}{\tau_p}$ концентрация дырок вблизи запертого слоя обращается в ноль, т.е. $p_n|_{x=0} = 0$ и $I_{o\delta}$ начинает уменьшаться. При этом условии из (1.11) можно получить соотношение:

$$\operatorname{erfc} \sqrt{Q} = \frac{1}{1 + I_{o\delta} / I_{np}} \quad (12)$$

Анализ формулы (1.12) показывает, что продолжительность переходного процесса, когда $I_{o\delta}$ остается постоянным можно выразить так:

$$t_1 = 0,2(I_{np} / I_{o\delta}) \tau_p \quad (13)$$

По истечении времени t_1 начинается уменьшение обратного тока диода, который описывается формулой (1.6), если принять за начало отсчета $Q=Q^1$.

На рис.1 е, ж, з, и, к представлены: последовательное изменение концентрации дырок в базе диода (е), временные диаграммы импульса ЭДС (ж), тока диода (з), напряжение на базе диода (и), напряжение в р-п-переходе (к) при переключении диода из прямого на обратное напряжение при большом внешнем сопротивлении.

2. Переходные процессы при включении диода

При подаче на диод прямого напряжения ток через диод устанавливается не сразу, так как со временем происходит накопление в базе инжектированных через р-п-переход неосновных носителей (дырок) и их нейтрализация электронами подтянутыми к р-п-переходу из глубины базы.

Это вызывает уменьшение сопротивления базы и процесс называют модуляцией сопротивления базы, которая происходит не мгновенно, а со временем.

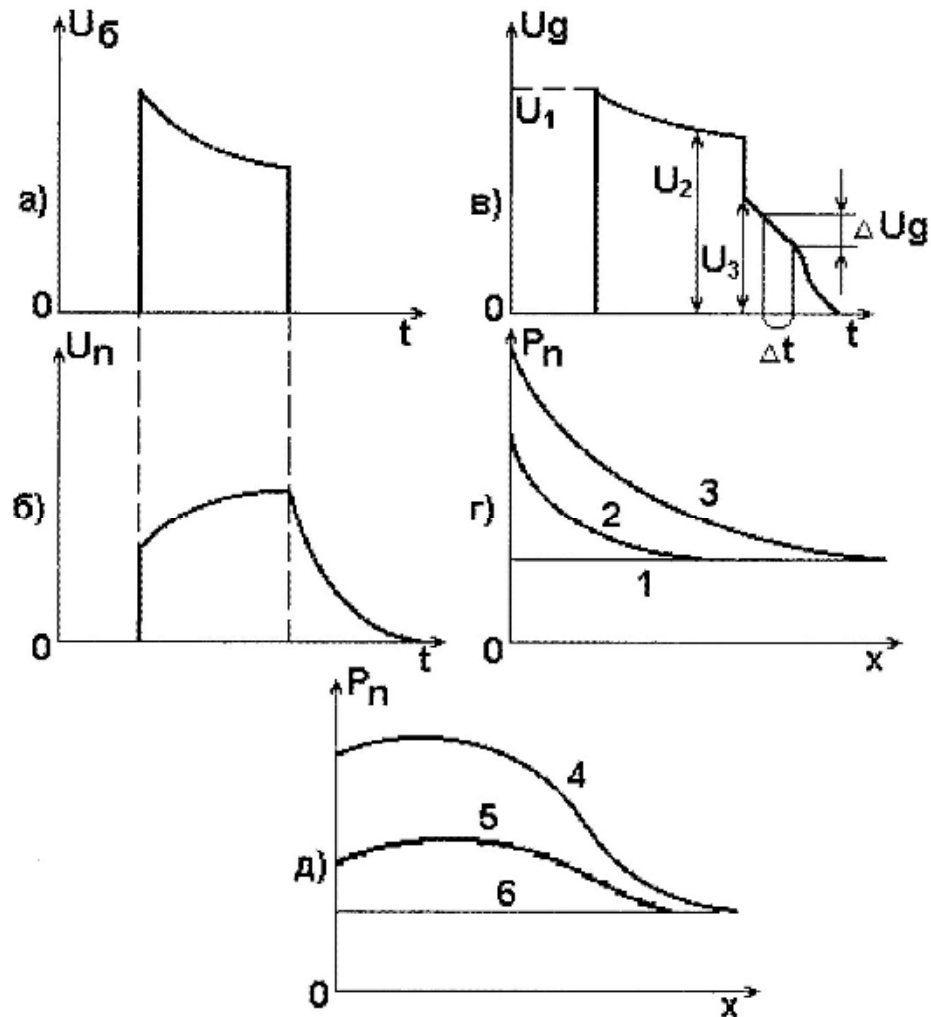


Рис. 2. Временные диаграммы напряжения при прохождении через диод прямоугольного импульсного тока: а) – напряжение на базе диода б) – напряжение на р-п – переходе; в) – суммарное напряжение на диоде г) – распределение концентрации неосновных носителей в базе диода в разные моменты при включении диода д) – при окончании импульса

По мере накопления дырок, их нейтрализации электронами и уменьшения сопротивления базы происходит перераспределение напряжения

между сопротивлением базы и р-п-переходом - падение напряжения на базе диода уменьшается (рис. 2а), а на р-п-переходе увеличивается (рис. 2б) вызывая увеличение уровня инжекции дырок (рис. 2г). При длительном прохождении прямого тока в системе наступает стационарное состояние, при котором в области базы вблизи р-п-перехода имеется повышенная концентрация дырок и по мере удаления вглубь базы она уменьшается, экспоненциально (рис. 2г, кривая 3). На рис. 2 а, б, в, г, д представлены: изменение напряжения на базе диода (а), изменение напряжения на р-п-переходе (б), изменение суммарного напряжения (в) и изменение концентрации дырок при включении диода (г) и при окончании импульса (д).

В момент окончания импульса тока напряжение на базе диода скачком падает до нулевого значения. Величина скачка определяется сопротивлением базы и амплитудой импульса тока.

Величину базового сопротивления можно найти, измеряя начальное падение напряжения на диоде U_1 . Зависимость сопротивления базы от тока диода определяется измерением перепада напряжения (U_2-U_3) после окончания импульса тока.

После окончания процесса накопления неосновных носителей в базе, величины напряжений на диоде, на базе диода и на р-п-переходе достигают установившихся значений. Распределение дырок в базе в это время также соответствует установившемуся состоянию (рис. 2г, кривая 3).

3. Переходные процессы при выключении диода

В момент окончания импульса тока через диод, т.е. в момент разрыва цепи с диодом исчезает падение напряжения на объемном сопротивлении базы диода (рис. 2а). Концентрация дырок в базе около р-п-перехода мгновенно измениться не может (рис. 2д) поэтому напряжение на р-п-переходе (рис. 2б) и на диоде (рис. 2в) после выключения тока уменьшается

замедленно по мере рекомбинации неравновесных носителей в базе (рис. 2д) остаточное напряжение на диоде уменьшается до нуля после рекомбинации всех неравновесных носителей в базовой области диода. Этот процесс называется спадом послеинжекционной ЭДС.

Накопленные вблизи р-п-перехода дырки исчезают путем рекомбинации и диффузии вглубь базы. По мере уменьшения концентрации дырок вблизи р-п-перехода уменьшается напряжение на нем и уменьшается напряжение на диоде.

Найдем закон изменения напряжения на диоде, пренебрегая диффузией дырок вглубь базы.

Закон уменьшения концентрации дырок вблизи р-п-перехода можно записать так:

$$p_n|_{x=0} = p_{n0} + \nabla p_n|_{x=0} e^{-t/\tau_p} \quad (14)$$

где $\nabla p_n|_{x=0}$ - избыточная концентрации дырок.

Подставляя значение $\nabla p_n|_{x=0}$ в (3.1) получим:

$$p_n|_{x=0} = p_{n0} \left(e^{\ell U_3 / kt} - 1 \right) e^{-t/\tau_p} + p_{n0} \quad (15)$$

считая, что $\nabla p_n|_{x=0} > p_{n0}$, формулу (3.2) можно записать так:

$$p_n|_{x=0} \approx p_{n0} e^{\ell U_3 / kt} e^{-t/\tau_p} \quad (16)$$

напряжение на переходе связано с концентрацией дырок в базе уравнением вида:

$$U_n = U_\delta = \frac{kt}{\ell} \ln \frac{p_n|_{x=0}}{p_{n0}} \quad (17)$$

Из (3.3) и (3.4) можно получить следующее выражение:

$$U_n = U_\delta = U_3 - \frac{kt}{\ell} \frac{t}{\tau_{lp}} \quad (18)$$

Уравнение (3.5) можно использовать для определения времени жизни дырок в базе диода, для этого измеряют перепад напряжения ∇U_3 на линейном участке кривой $U\partial(t)$ и время, соответствующее перепаду, ∇t тогда время жизни дырок будет:

$$\tau_p = \frac{kt}{e} \frac{\nabla t}{\nabla U\partial} \quad (19)$$

Из анализа осциллограмм переходного процесса можно подсчитать величину потенциального барьера на р-п-переходе. Для этого измеряют величину начального остаточного напряжения U_3 в зависимости от значения прямого тока через диод. С увеличением амплитуды импульса прямого тока величина U_3 стремится к некоторому постоянному значению, определяют это напряжение U_3 . Концентрацию дырок вблизи р-п-перехода можно записать так:

$$p_n|_{x=0} = p_{n0} \ell^{-\frac{t(U_k - U_3)}{kt}} \quad (20)$$

С увеличением амплитуды импульсов величина p_n стремится к p_{n0} , поэтому при достаточно больших импульсах тока остаточное напряжение $U_3 = U_k$.

4. Схема установки для исследования импульсных характеристик диодов

Исследование переходных процессов диодов проводится по схемам, представленным на рис. 3 а, б. На рис. 3а дана схема для исследования процесса переключения диода из прямого направления в обратное в двух режимах: при малом сопротивлении, когда R_2 замкнуто и при большом внешнем сопротивлении, когда R_2 включено в цепь. С помощью источника постоянного “ин” задается прямой, регулируемый потенциометром R_3 ток. Величина этого тока измеряется миллиамперметром “ма”. Импульс

обратного напряжения подается на диод “д” от генератора “ги” через сопротивление R_2 , который можно замкнуть накоротко или включить в цепь ключом k_1 .

Обратный ток диода измеряется с помощью осциллографа “эо”. Сигнал, пропорциональный току через диод, снимается с небольшого известного сопротивления R и подается на вход вертикального отклонения усилителя “эо”. Замыкание и размыкание ключа k_1 позволяет исследовать процессы в диоде соответственно при малом и большом внешнем сопротивлении цепи диода.

С помощью схемы на рис. 3б исследуются переходные процессы при включении и выключении диода в прямом направлении. Импульс тока подается через ламповый диод Л и сопротивление R_4 . Величина R_4 выбрана большой так, чтобы ток в цепи не зависел от сопротивления исследуемого полупроводникового диода. Ламповый диод необходим в схеме для устранения обратного выброса напряжения, свойственного генераторам с емкостным или трансформаторным выходом. В данной работе в качестве импульсного генератора используется генератор Г5-54. Амплитуда импульса измеряется с помощью измерителя амплитуды генератора. Напряжение на диоде наблюдается и измеряется с помощью осциллографа. Амплитуда тока через диод измеряется также осциллографом по падению напряжения на известном по величине сопротивлении.

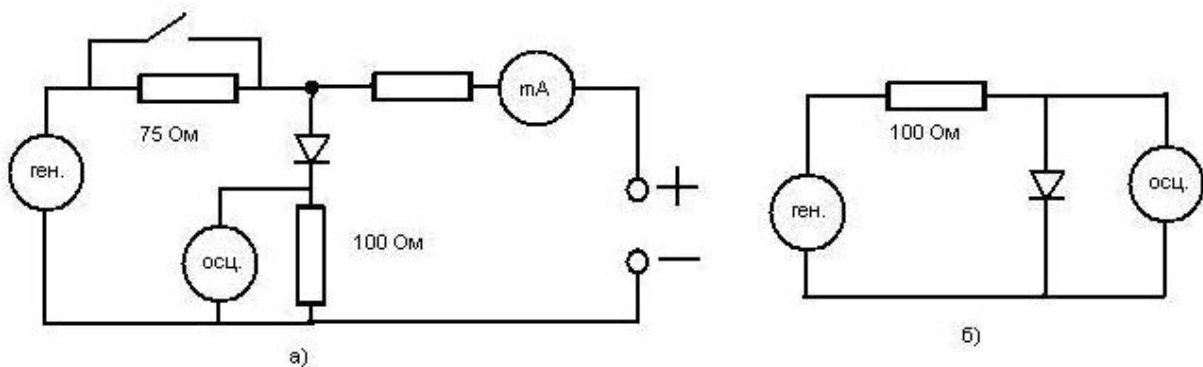


Рис. 3: а) – дана схема для исследования процесса переключения диода из прямого направления в обратное в двух режимах: при малом сопротивлении, когда R_2 замкнуто и при большом внешнем сопротивлении, когда R_2 включено в цепь; б) – С помощью этой схемы исследуются переходные процессы при включении и выключении диода в прямом направлении

5. Порядок проведения исследований

а) Переходные процессы при переключении диода из прямого направления в обратное

Измерения проводятся по схеме, представленной на рис. 3а.

1. Включить источник питания “ин” и установить прямой ток через диод в пределах 15-20 мА.

2. Включить генератор импульсов “ги” и электронный осциллограф в сеть и прогреть 10-15 мин. Затем подключить выход “гн” к “эо” и проверить форму импульса и его параметры.

3. Снять осциллограммы обратного тока диода, подавая отрицательный импульс на диод, при включенном и замкнутом сопротивлении R_2 .

4. Включить сопротивление R_2 , и изменяя либо его величину, либо амплитуду импульса генератора добиться, чтобы обратный импульс тока диода имел плоскую вершину, измерить длительность плоской вершины и величину амплитуды импульса $U_{им}$. Рассчитать время жизни неосновных носителей базы по формуле (1.13), полагая в ней:

$$I_{обр} = \frac{U_{им}}{R_2} - I_{пр}; R_2 = 750\Omega \quad (21)$$

б) Переходные процессы при включении диода

Изучение переходных процессов в этом случае проводится по схеме, представленной на рис. 3б.

1. От генератора импульсов подать импульс прямого тока на исследуемый диод. Измерить амплитуду начального напряжения на диоде U_1 . Измерить амплитуду напряжения U_{R4} на сопротивлении R_4 . Определить сопротивление базы диода по формуле:

$$R_{\sigma} = \frac{U_1}{U_{R4}} R_4; R_4 = 100\Omega \quad (22)$$

2. Повторить измерения для импульса тока, отличающегося от первоначального в 1,5 - 2 раза.

в) Переходные процессы при выключении диода

1. От генератора импульсов подать импульс прямого тока через исследуемый диод и получить осциллограмму переходного процесса на экране осциллографа форма переходного процесса должна иметь вид рис. 2в. Измерить по осциллограмме длительность Δt и величину ΔU линейного изменения напряжения на диоде. Рассчитать время жизни дырок τ_p по формуле (3.6). Сравнить с результатом полученным выше.

2. Снять экспериментальную зависимость величины напряжения U_3 от амплитуды импульсов тока через диод. При больших импульсов тока остаточное напряжение $U_3 = U_k$. Таким путем определить величину контактной разности потенциалов U_k .

Контрольные вопросы

1. От каких физических явлений в структуре с p-n-переходом зависят переходные процессы в диоде?
2. Что называется переходным процессом?

3. Нарисуйте осциллограмму переходного процесса при переключении диода из прямого направления в обратное, когда сопротивление внешней цепи мало и велико.
4. Нарисуйте изменения концентрации инжектированных носителей заряда в область базы при переключении диода из прямого направления в обратное.
5. Что называется модуляцией сопротивления базы? Расскажите физические процессы, происходящие при этом.
6. От чего зависят частотные свойства диода?
7. Что называется временем восстановления обратного тока?
8. Какие процессы происходят в диоде при подаче импульса прямого тока и при его включении?
9. Какие параметры и каким образом можно измерить из анализа переходных процессов в диоде?
10. Что называется временем установления прямого сопротивления?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучение особенностей работы биполярного транзистора, измерение статических характеристик в схемах с общей базой и эмиттером и определение основных параметров транзистора.

Принцип работы транзистора

Транзистор является полупроводниковым прибором, имеющим два р-п-перехода в одном монокристалле полупроводника (рис. 1). Причем, если, например, внешние слои имеют проводимость р-типа, то его называют транзистором р-п-р - типа. В настоящее время наиболее распространенным

типом являются транзисторы типа p-n-p, поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только этот тип транзистора. Однако все рассуждения справедливы и для транзисторов типа n-p-n. Переход, смещенный в прямом направлении называют эмиттерным. соответственно прилегающую к нему p-область - эмиттером. Смещенный в обратном направлении, называют коллекторным и прилегающую к нему область - коллектором. Среднюю n-область называют базой.

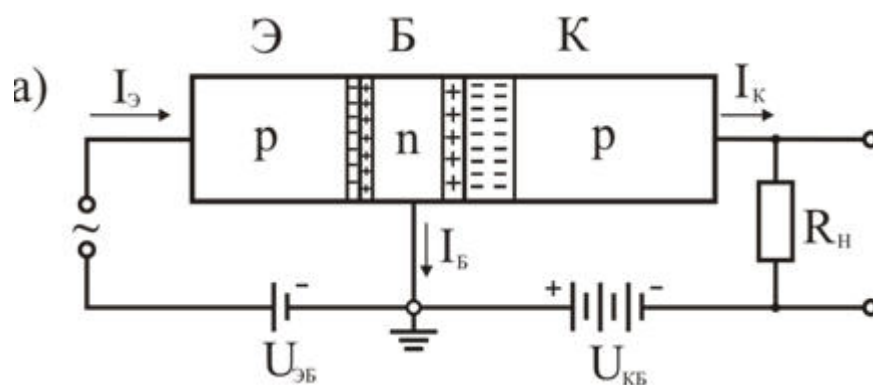
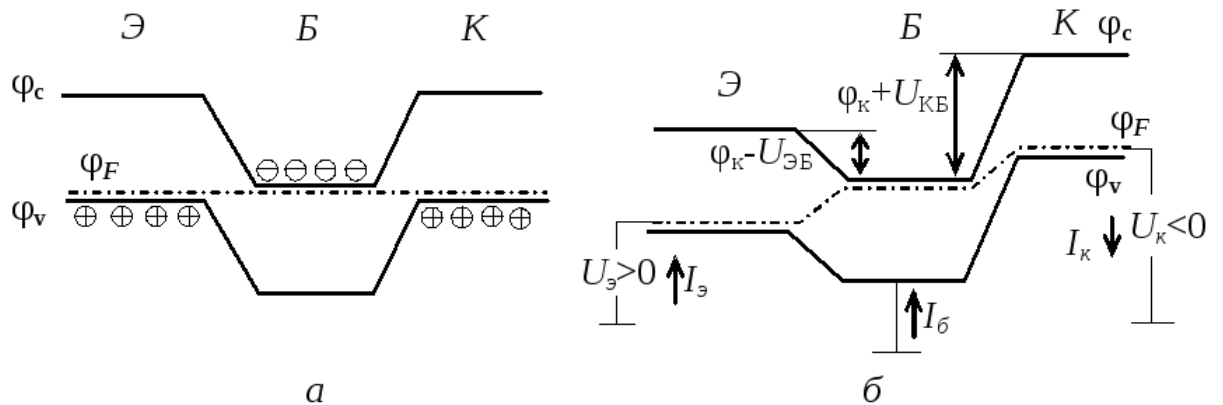


Рис.1. Схематическое изображения транзистора p-n-p типа

Энергетическая диаграмма структуры транзистора для равновесного состояния (когда на транзистор не подано смещение) и для нормального смещения показаны на рис.2, а и б. С приложением к эмиттерному переходу прямого напряжения происходит инжекция дырок из базы в эмиттер. Однако, ввиду того, что эмиттер легирован на много сильнее базы, поток инжектированных дырок будет много превышать поток электронов. На



границе эмиттерного перехода устанавливается повышенная концентрация дырок в области базы и электронов в области эмиттера. Эти концентрации определяются уравнениями:

Рис.2. Энергетическая диаграмма транзистора: а) при отсутствии смещения; б) при нормальных смещениях на переходах.

$$p_{n1} = p_{n0} e^{\frac{eU_{\text{э}}}{kT}} \quad (1)$$

$$n_{p1} = n_{p0} e^{\frac{eU_{\text{э}}}{kT}} \quad (2)$$

где p_{n0} - равновесная концентрация дырок в базе; n_{p0} - равновесная концентрация электронов в эмиттере.

Инжектированные в базу дырки в результате диффузии будут перемещаться к коллекторному переходу и, если ширина базы намного меньше диффузионной длины l , почти все дырки дойдут до коллектора и

полем запирающего слоя будут переброшены в p-область коллектора. Возникающий вследствие этого коллекторный ток обратного направления, то его сопротивление на несколько порядков выше сопротивления эмиттерного перехода. В цепи коллектора, следовательно, может быть включено достаточно большое сопротивление нагрузки. Относительно малое изменение напряжения на эмиттере будет вызывать большое изменение напряжения на сопротивлении нагрузки. В результате различий входного и выходного сопротивлений транзистор дает усиление по мощности. Очевидно, что усиление по мощности будет тем больше, чем большая часть тока, проходящего через эмиттер, будет доходить до коллектора. Отношение приращения тока коллектора к вызвавшему его приращению тока эмиттера при постоянном напряжении на коллекторе называют коэффициентом передачи тока эмиттера.

$$\alpha = \frac{dI_k}{dI_{\ominus}} \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что коллекторный ток транзистора обусловлен не всем эмиттерным током, а только его дырочной составляющей. Поэтому коэффициент передачи зависит от того, какую часть тока эмиттера составляет его дырочная компонента. Для характеристики эмиттерного перехода вводят коэффициент инжекции. Коэффициент инжекции есть отношение приращения дырочной составляющей тока к приращению полного тока эмиттерного перехода.

$$\gamma = \frac{dI_{p\ominus}}{dI_{\ominus}} = \frac{dI_{p\ominus}}{d(I_{n\ominus} + I_{p\ominus})} \quad (4)$$

Как уже отмечалось, дырки, инжектированные эмиттером, вследствие рекомбинации в базе не все доходят до коллектора. Для того чтобы отразить это, вводят понятие коэффициента переноса, или коэффициента рекомбинации. По определению:

$$H = \frac{dI_{pk}}{dI_{p\rightarrow}} \quad (5)$$

где dI_{pk} - приращение тока инжектированных эмиттером дырок, доходящих до коллектора.

Если считать ток коллектора чисто дырочным, то коэффициент передачи тока будет равен произведению коэффициента инжекции и коэффициента переноса:

$$\alpha = \gamma H \quad (6)$$

Статические характеристики транзистора в схеме с общей базой

Схемы включения транзистора с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором показаны на рис. 3 а, б, в. полярность источников питания и направления токов соответствуют активной области работы транзистора. При любом включении транзистор характеризуется семействами входных и выходных характеристик. В схеме с общей базой семейство входных характеристик (рис. 4а) есть зависимость тока эмиттера от напряжения на эмиттере при постоянном напряжении коллектора; семейство выходных характеристик (рис. 4б) представляет собой зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе при постоянном токе эмиттера. Входная характеристика транзистора при $u=0$ подобна прямой ветви ВАХ р-п - перехода. Однако, при наличии отрицательного напряжения на коллекторе происходит некоторое смещение характеристик, и ток через эмиттерный переход оказывается не равным нулю при отсутствии на нем напряжения (рис.4, а).

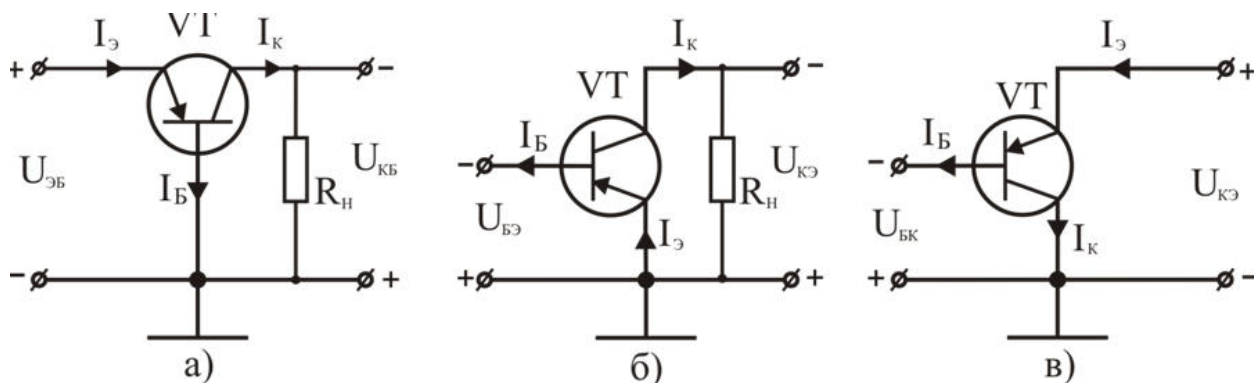


Рис. 3. Схемы включения биполярных транзисторов: а) ОБ б) ОЭ в) ОК

Рассмотрим это явление подробнее. При нормальном смещении на транзисторе распределение концентрации неосновных носителей в базе транзистора можно считать линейным, как показано на рис. 5. В этом случае при постоянном токе эмиттера градиент концентрации неосновных носителей в базе должен оставаться постоянным. С увеличением отрицательного напряжения на коллекторе запиорный слой расширяется (отмечено пунктирной линией на рис. 5), ширина базы уменьшается и становится равной w .

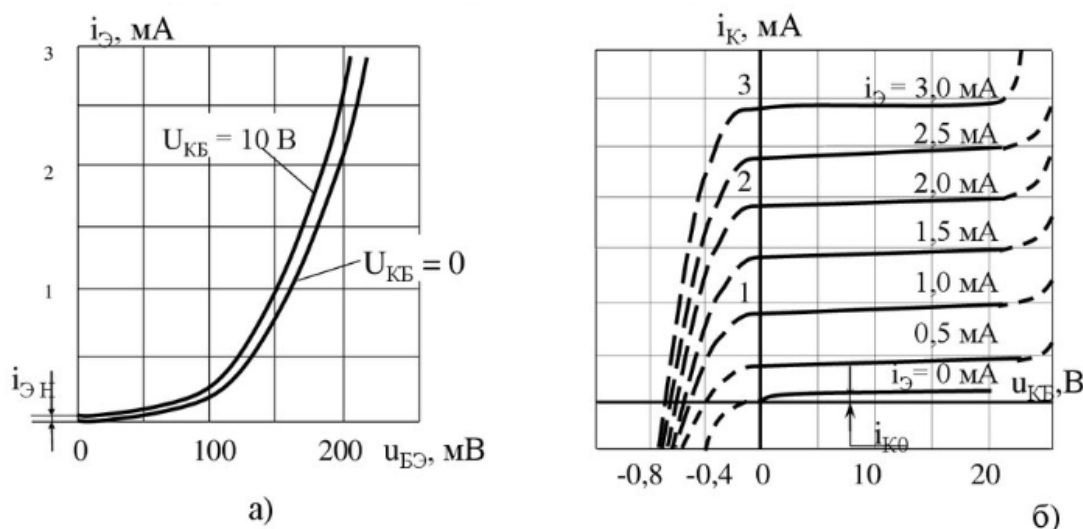


Рис.4. Семейства статических входных (а) и выходных (б) характеристик транзистора, включенного по схеме с общей базой

Как видно из рисунка, градиент концентрации может оставаться в этом случае постоянным только при уменьшении концентрации неосновных носителей у эмиттерного перехода до величины p . Это соответствует уменьшению напряжения на эмиттере и смещению характеристик влево. Кроме того, если напряжение на эмиттерном переходе равно нулю, то при наличии отрицательного напряжения на коллекторе ток через него не равен нулю. Отрицательное напряжение на коллекторе приводит к уменьшению концентрации дырок в базе и состояние термодинамического равновесия для эмиттерного перехода нарушается, можно сказать, что поток дырок из эмиттера в базу превышает встречный поток дырок из базы. Ток через эмиттерный переход будет равен нулю только при некотором отрицательном смещении на нем. На семействе входных характеристик выделяют три характерные области (рис. 4, б). Область 1 соответствует отрицательному напряжению на коллекторе и прямому области насыщения; здесь оба перехода транзистора смещены в прямом направлении область 3 называют областью отсечки; эмиттерный и коллекторный переходы здесь смещены в обратном направлении. Выходная характеристика транзистора при токе эмиттера, равном нулю, сходна с ВАХ одиночного р-п-переход, смещенного в обратном направлении, ток коллектора при отключенном эмиттере называют обратным током коллекторного перехода и обозначают i_c , величина i_c , незначительно зависящая от напряжения, является одним из важных параметров транзистора. С увеличением напряжения на коллекторе, ток коллектора растет. Величину наклона кривых $i_c(u_c)$ характеризуют коллекторным сопротивлением r_c . Не останавливаясь на этом вопросе подробно, отметим только, что с увеличением напряжения на коллекторе, как уже указывалось, ширина базы уменьшается, вследствие чего уменьшается вероятность рекомбинации дырок на пути от эмиттера к коллектору. Следовательно, при постоянном токе эмиттера ток дырок, доходящих до коллектора должен возрастать с повышением напряжения на переходе. Этим эффектом в основном и обусловлено сопротивление коллектора транзистора,

которое не может быть бесконечно большим даже при идеальном р-п – переходе.

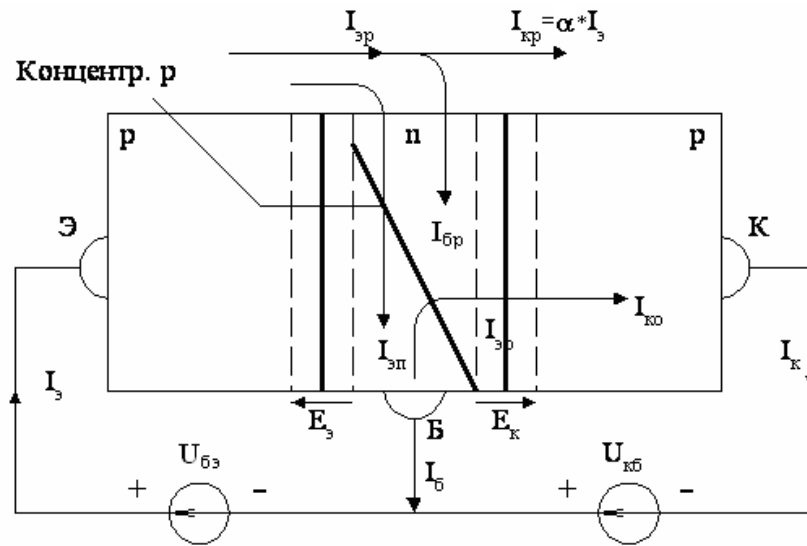


Рис.5.Распределение концентрации дырок в базе транзистора при постоянном токе эмиттера и различных напряжениях на коллекторе

Статические характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером

Характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером (рис. 6 а, б) качественно подобны характеристикам в схеме с общей базой. Входная характеристика (рис.6, а) при коллекторном напряжении $u = 0$ проходит через начало координат и отличается от ВАХ одиночного р-п - перехода масштабом оси токов, поскольку базовый ток меньше тока через переход i . При отрицательных напряжениях коллектора характеристики смещаются вправо и вниз. Это смещение качественно можно объяснить следующим образом. Пусть напряжение на эмиттерном переходе постоянно ($u = \text{const}$). Тогда постоянной будет и концентрация дырок в базе вблизи эмиттера. Увеличение отрицательного напряжения u будет сопровождаться уменьшением ширины базы l , следовательно, уменьшением общего количества дырок, находящихся в базе. Поэтому число рекомбинаций электронов и дырок в базе в единицу времени уменьшится. Так как

электроны для рекомбинации приходят через базовый вывод, то, следовательно, ток базы уменьшится. Что и означает смещение характеристик вправо (рис.6, а) Объясним смещение входных характеристик вниз. При $u = 0$ и отрицательном напряжении на коллекторе в базе транзистора концентрация дырок меньше равновесной, так как у коллекторного перехода эта концентрация равна нулю, а у эмиттерного перехода ее величина определяется равновесным значением. Поэтому в области с базы процесс тепловой генерации преобладает над процессом рекомбинации. Генерируемые электроны уходят из базы через базовый вывод, что означает наличие электрического тока, направленного в базу транзистора. Сравнивая выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 6б) и общей базой (рис. 4б), можно заметить две наиболее существенные особенности: во-первых, характеристики в схеме с общим эмиттером имеют больший наклон, свидетельствующий об уменьшении выходного сопротивления транзистора и, во-вторых, переход в режим насыщения наблюдается при отрицательных напряжениях на коллекторе. Рост тока коллектора с увеличением напряжения и определяется уменьшением ширины базы, коэффициент переноса, а, следовательно, и коэффициент передачи тока эмиттера транзистора растет, коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером растет быстрее коэффициента поэтому при постоянном токе базы ток коллектора увеличивается сильнее, чем в схеме с общей базой. Насыщение транзистора, критерием которого является равенство напряжения на коллекторном переходе нулю, наступает при небольших отрицательных напряжениях между коллектором и эмиттером, это объясняется тем, что напряжение и в схеме с общим эмиттером равно сумме напряжений на обоих переходах, следовательно, напряжение на коллекторном переходе равно нулю тогда, когда величина и равна напряжению на эмиттерном переходе, а это наступает при отрицательном значении u .

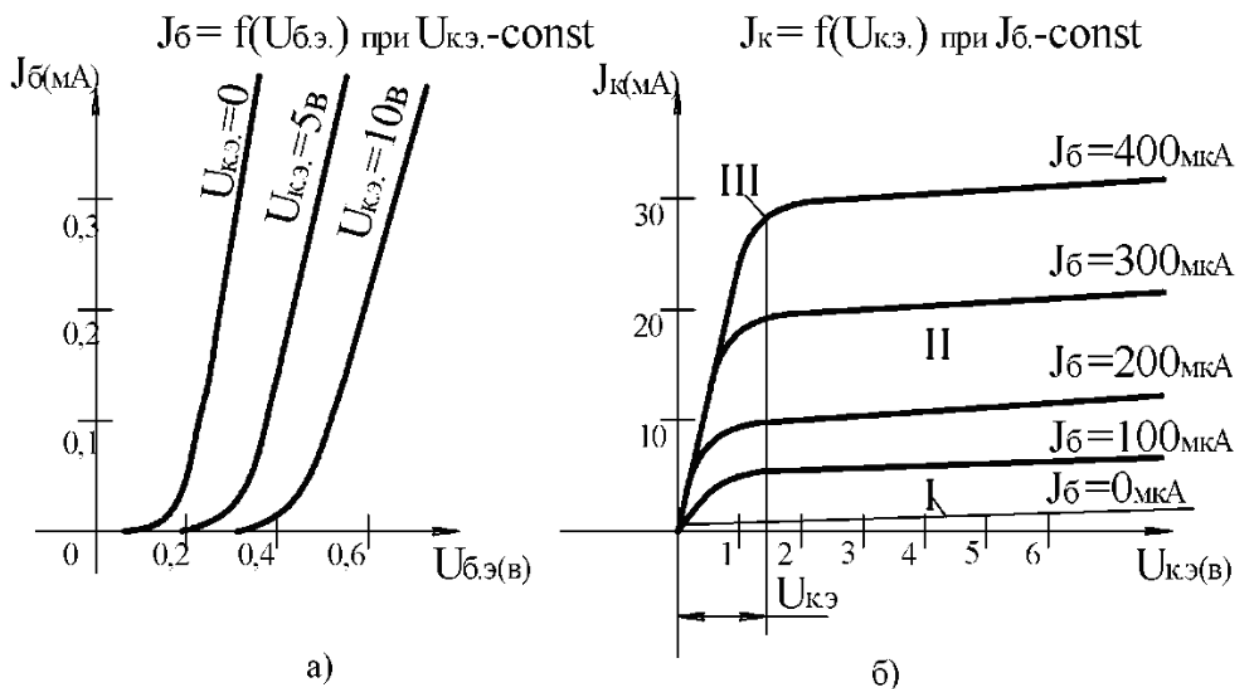


Рис.6. Семейства статических входных (а) и выходных (б) характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Выполнение работы

1. Установить исследуемый транзистор на макете по схеме см. рис. 3а.
Снятие входных статических характеристик по схеме с общей базой.
1. Включить приборы в сеть прогреть 5 минут.
2. Изменяя плавно потенциометром R_i на блоке питания напряжение $U_{эб}$ от 0 до 150 мВ шагом 30 мВ, снять $I_э$ при различных $U_k - \text{const}$, данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

$U_{кБ} = 0В$		$U_{кБ} = 1В$		$U_{кБ} = 2В$	
$U_{эБ}, В$	$I_э, МА$	$U_{эБ}, В$	$I_э, МА$	$U_{эБ}, В$	$I_э, МА$

Напряжение U_k задается потенциометром R2 и измеряется вольтметром V2.

2. Снятие выходных статических характеристик по схеме с общей базой.

2.1 Значение тока эмиттера I_3 устанавливается потенциометром R1 и поддерживается в процессе наблюдения постоянным. Напряжение U_k изменяя плавно потенциометром R2 от 0 до 10В шагом 1В, снять I_k и записать в таблицу 2.

Таблица 2

$I_3 = 1MA$		$I = 2MA$		$I = 3MA$	
$U_{кБ}, B$	I_k, MA	$U_{кБ}, B$	I_k, MA	$U_{кБ}, B$	I_k, MA

3. В прямоугольной системе координат построить семейства входных статических характеристик.

4. Рассчитать h-параметры транзистора методом характеристического треугольника (рис. 4а). На входных характеристиках транзистора строят треугольник ABC, из которого находим $h_{11Б} = \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_3}$ при $U_{кБ} = 0$,

из этого же треугольника определяем $h_{12Б} = \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta U_{кБ}}$ при $\Delta I_3 = 0$.

Параметры $h_{21Б}$ и $h_{22Б}$ определяют по выходным характеристикам (рис. 4б).

Построив характеристический треугольник FNK найдем $h_{21Б} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_3}$ при

$\Delta U_{кБ} = 0$, $h_{22Б} = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{кБ}}$ при $\Delta I_3 = 0$.

5. Установить исследуемый транзистор на макете по схеме рис. 3б. Снятие входных статических характеристик по схеме с общим эмиттером.

Таблица 3

$U_{кЭ} = 0B$		$U_{кЭ} = 5B$		$U_{кЭ} = 10B$	
$U_{БЭ}, B$	I_B, MA	$U_{БЭ}, B$	I_B, MA	$U_{БЭ}, B$	I_B, MA

Снять входные статические характеристики для данных напряжений U_k устанавливается потенциометром R2 и контролируется вольтметром V2. Напряжение $U_{БЭ}$ изменяется от 0 до 150 мВ с шагом 30 мВ и устанавливается потенциометром R1.

6. Снятие выходных статических характеристик по схеме с общим эмиттером.

Таблица 4

$I_B = 0.5MA$		$I_B = 0.8MA$	
$U_{КЭ}, B$	I_k, MA	$U_{КЭ}, B$	I_k, MA

6.1 Снять выходные характеристики при данных значениях тока базы, которые устанавливаются потенциометром R1 и поддерживаются постоянным. Напряжение $U_{КЭ}$ изменяют потенциометром R2 от 0 до 500 мВ с шагом 50мВ

6.2 В прямоугольной системе координат построить семейства входных и выходных статических характеристик.

6.3 Пользуясь семейством выходных характеристик транзистора (рис. 6а), нетрудно определить значение коэффициента усиления по току.

Взяв приращение ΔI_K и ΔI_B между точками Б и С при постоянном напряжении $U_{КЭ}$ найдем: $\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$ при $U_{КЭ} = const$

Входное сопротивление транзистора R. Можно найти из входных характеристик (рис. 6б). По приращению ΔI_B и $\Delta U_{БЭ}$ между точками Б и С при постоянном $U_{КЭ}$ находим: $R_{bx} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B}$ при $U_{КЭ} = const$.

Контрольные вопросы

1. Что называется биполярным транзистором?

2. Принцип работы БТ.
3. Нарисуйте схему включения БТ с указанием полярности и направления токов.
4. Как объяснить вид входных и выходных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ и ОЭ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ И ПАРАМЕТРОВ БТ

Цель работы: изучение частотных характеристик БТ в схемах с ОЭ и ОК.

Уравнение диффузии

Перенос зарядов в транзисторе осуществляется путем диффузии и дрейфа. Диффузия возникает при наличии градиента концентрации зарядов. Движение зарядов под действием электрического поля называется дрейфом. По основному механизму прохождения базы носителями зарядов транзисторы делятся на дрейфовые и без дрейфовые. При изготовлении дрейфовых транзисторов добиваются неравномерного распределения примеси в области базы, в результате чего возникает постоянное внутреннее электрическое поле, которое ускоряет движение неосновных носителей заряда, входящих из эмиттера в базу. Следовательно, основным механизмом движения носителей заряда в базе транзисторов этого типа - дрейф в постоянном электрическом поле базы.

В без дрейфовых транзисторах распределение примесей в базе можно считать равномерным. Так как электрическое поле в базе таких транзисторов практически отсутствует, основным механизмом движения носителей заряда через базу в них становится диффузия. Примером без дрейфовых транзисторов могут служить транзисторы сплавного типа. Рассмотрим механизм переноса зарядов через базу без дрейфового транзистора р-п-р типа. В активном режиме работы напряженность электрического поля имеет

значительную величину в области р-п переходов, а в базе, эмиттере и коллекторе большинства типов транзисторов движение зарядов можно считать диффузионным.

Предположим, что эмиттер и коллектор представляют собой параллельные плоскости настолько больших (по сравнению с шириной базы) размеров, что можно учитывать диффузию зарядов в базе только в одном направлении - от эмиттера к коллектору. При этом предположении выведем уравнение диффузии зарядов. Принимая направление перпендикулярное к плоскостям эмиттера и коллектора, за ось x и плоскость границы эмиттер - база за начало отсчета, можно выразить общее количество дырок p в объеме базы от 0 до x через концентрацию их p в этом интервале

$$P = \int_0^x p dx \quad (1)$$

Скорость диффузии пропорциональна градиенту концентрации, следовательно, скорость изменения количества дырок в объеме базы от 0 до x за счет диффузии дырок определяется выражением

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

где $\frac{\partial P}{\partial x}$ - градиент концентрации дырок в базе, а D - коэффициент диффузии.

В данном случае коэффициент диффузии - это есть число дырок, проходящих в направлении градиента концентрации через поперечное сечение в 1 см^2 за 1 с . Продифференцировав обе части уравнения (2) по x , можно получить закон изменения во времени концентрации дырок в базе вследствие диффузии:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (3)$$

Так как из выражения (1)

$$\frac{\partial p}{\partial x} = P \quad (4)$$

уравнение (3) можно привести к виду

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (5)$$

Однако концентрация дырок в базе изменяется не только за счет диффузии, но и за счет рекомбинации их с основными носителями заряда в базе - электронами. В базе постоянно имеется небольшое количество дырок, являющихся для нее неосновными носителями. Их равновесную концентрацию в базе через p_p . После введения в базу некоторого количества дырок из эмиттера в момент времени $t = 0$ концентрация их в базе становится равной $p_p + p_0$. За счет рекомбинации избыточная концентрация дырок уменьшается со временем по экспоненциальному закону:

$$P = p_0 + p_0 e^{\frac{-t}{\tau_p}} \quad (6)$$

Интервал времени $T = \tau_p$, по прошествии которого избыточная концентрация дырок в базе уменьшается в e раз называется временем жизни неосновных носителей. Поскольку процессы диффузии и рекомбинации неосновных носителей в базе протекают одновременно и зависят один от другого, основные параметры, характеризующие эти процессы, оказываются взаимосвязанными. Длина диффузии L , которая определяется как расстояние, на котором количество дырок в базе убывает в e раз, коэффициент диффузии D и время жизни τ_p связаны между собой уравнением:

$$\tau_p = \frac{L^2}{D} \quad (7)$$

Скорость изменения концентрации неосновных носителей в базе можно найти путем дифференцирования по времени уравнения (6)

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{p_0}{\tau_p} e^{-\frac{t}{\tau_p}} = \frac{P - P_p}{\tau_p} \quad (8)$$

Одновременное действие процессов диффузии и рекомбинации приводит к зависимости концентрации дырок в базе от времени определяемой уравнением

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad (9)$$

- это уравнение называется уравнением диффузии.

Частотная зависимость параметров транзистора

Полученное при упрощении реальной картины процессов, происходящих в транзисторе, уравнение диффузии (9) позволяет, однако, вычислить многие параметры транзистора и предсказать ряд весьма существенных его свойств. В частности, решение этого уравнения для случая действия на эмиттерном переходе транзистора в активном состоянии переменного синусоидального сигнала малой амплитуды с частотой ω дает следующую зависимость между переменными составляющими токов эмиттера $I_{эп}$ и коллектора $I_{кп}$.

$$I_{кп} = I_{эп} \operatorname{sch} \frac{W}{L} \sqrt{1 + j\omega\tau_p} \quad (10)$$

где W - ширина базы, L - длина диффузии дырок в базе, ω - частота переменного напряжения, τ_p - время жизни дырок в базе, $j = \sqrt{-1}$ параметр α транзистора на переменном токе определяется выражением

$$\alpha = \frac{I_{кп}}{I_{эп}} = \operatorname{sch} \frac{W}{L} \sqrt{1 + j\omega\tau_p} \quad (11)$$

Таким образом, величина параметра α , определяющего долю дырок, проходящих путем диффузии из эмиттера в коллектор при действии синусоидального сигнала малой амплитуды, оказывается зависящей от

толщины базы W , среднего времени жизни дырок в базе τ_p , диффузионной длины дырок в базе L и частоты переменного сигнала ω .

Получим приближенное значение параметра α на постоянном токе. Как известно, секанс гиперболического аргумента z разлагается в ряд

$$schZ = \frac{Z}{\ell^z - \ell^{-z}} = 1 - \frac{1}{2}Z^2 + \frac{3}{4}Z^4 - \dots$$

Для реальных транзисторов всегда выполняется условие $\frac{W}{L} \ll 1$ поэтому при разложении в ряд гиперболического секанса с аргументом $Z = \frac{W}{L} \sqrt{1 + j\omega\tau}$.

Можно ограничиться двумя первыми членами разложения. Тогда приближенное значение параметра α на постоянном токе $\Gamma^2=0$ определяется выражением:

$$\alpha_0 \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{W^2}{L^2} \quad (12)$$

Выразив гиперболический секанс через гиперболический косинус, можно получить приближенное значение параметра α на любой частоте ω

$$\alpha = sch \frac{W}{L} \sqrt{1 + j\omega\tau_p} = \frac{1}{ch \frac{W}{L} \sqrt{1 + j\omega\tau_p}} \quad (13)$$

так как $chZ = \frac{\ell^z + \ell^{-z}}{2} = 1 + \frac{Z^2}{2!} + \frac{Z^4}{4!} + \dots$

Ограничиваясь при условии $\frac{W}{L} \ll 1$ двумя первыми членами разложения, получаем:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{W^2}{L^2} (1 + j\omega\tau_p)} \quad (14)$$

Зависимость параметра α от частоты можно выразить отношением:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{2} \frac{W^2}{L^2}\right) \left[1 + \frac{1}{2} \frac{W^2}{L^2} (1 + j\omega\tau_p)\right]} \quad (15)$$

Пренебрегая в знаменателе членами содержащими отношение W^2/L в четвертой степени, и заменив отношение $W^2/2L^2$ на $1 - \alpha_0$, получим:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} \approx \frac{1}{1 - j\omega\tau_p \left(\frac{W^2}{2L^2}\right)} = \frac{1}{1 - j\omega\tau_p(1 - \alpha_0)} \quad (16)$$

Из выражения (2.7) следует, что при увеличении частоты сигнала от 0 до ω

$$\omega = \frac{1}{\tau_p(1 - \alpha_0)} = \omega_\alpha \quad (17)$$

называемой предельной частотой усиления в схеме с общей базой, модуль величины α уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со значением на постоянном токе или низкой частоте α_0 :

$$\left|\frac{\alpha}{\alpha_0}\right| = \frac{1}{\left|1 - j\frac{1}{\omega_\alpha}(\tau_p(1 - \alpha_0))\right|} = \frac{1}{|1 - j|} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

Линейная предельная частота f_α определяется выражением:

$$f_\alpha = \frac{\omega_\alpha}{2\pi} \quad (19)$$

Найденная зависимость коэффициента усиления транзистора по току α от частоты усиливаемого переменного сигнала ω показывает, что транзистор, включенный по схеме с общей базой, когда входным является ток эмиттера, а выходным- ток коллектора, может быть успешно использован для усиления переменного сигнала лишь на частотах, значительно меньше предельной частоты. Обычно для усиления переменного сигнала с частотой f ,

выбирают транзисторы, значение критической частоты для которых удовлетворяют соотношению:

$$f_{\alpha} > 10 \div 30 f \quad (20)$$

При выполнении этого условия параметр транзистора α на переменном токе можно считать примерно совпадающим с его значением на постоянном токе α_D

При использовании транзистора в схеме с общим эмиттером его усилительные свойства определяются величиной коэффициента передачи базового тока β . Приближенное выражение, дающее зависимость параметров β от частоты, можно получить следующим путем. Величина параметра α на частоте ω связана со значением его на постоянном токе α_0 соотношением

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - j\omega\tau_p(1 - \alpha_0)} = \frac{\alpha_0}{1 - j\frac{\omega}{\omega_{\alpha}}} \quad (21)$$

Используя эту формулу, получим значение параметра β на той же частоте:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha_0} = \frac{\alpha_0 \left(1 - j\frac{\omega}{\omega_{\alpha}}\right)}{\left(1 - j\frac{\omega}{\omega_{\alpha}}\right) \left(1 - j\frac{\omega}{\omega_{\alpha}} - \alpha_0\right)} = \frac{\frac{\alpha}{1 - \alpha_0}}{\frac{1 - \alpha_0 - j\frac{\omega}{\omega_{\alpha}}}{1 - \alpha_0}} = \frac{\beta_0}{1 - j\frac{\omega}{\omega_{\alpha}(1 - \alpha_0)}} = \frac{\beta_0}{1 - j\frac{\omega}{\omega_{\beta}}} \quad (22)$$

Очевидно, что уменьшение параметра β по модулю в $\sqrt{2}$ раз наступает на предельной частоте.

$$\omega_{\beta} = \omega_{\alpha}(1 - \alpha_0) \approx \frac{\omega_{\alpha}}{\beta_0} \quad (23)$$

Это означает, что при включении по схеме с общим эмиттером предельная частота транзистора ω_β оказывается примерно в β_0 раз меньшей значения предельной частоты при включении по схеме с общей базой ω_α .

Установим связь значений предельных частот ω_α и ω_β с такими параметрами транзистора, как ширина базы W , длина диффузии дырок в базе L , время жизни дырок τ_p и среднее время диффузии дырок через базу τ_D .

Величину заряда дырок в базе Q в установившемся режиме можно приближенно выразить через величину протекающего через базу тока коллектора I_k и среднее время диффузии дырок через базу τ_D :

$$Q = I_k \tau_D \quad (24)$$

Считая, что изменение концентрации дырок в базе происходит только за счет рекомбинации, из выражения (1.9) пренебрегая p_0 можно получить:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{D}{\tau_p} \quad (25)$$

Ток базы представляет собой рекомбинационный ток по всему объему базы.

$$I_\sigma = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q}{\tau_p} = I_k \frac{\tau_D}{\tau_p} \quad (26)$$

С другой стороны на постоянном токе $I_\sigma = \frac{I_k}{\beta}$ следовательно

$$\beta_0 = \frac{\tau_p}{\tau_D} \quad (27)$$

Используя уравнение (27), можно выразить коэффициент передачи базового тока β_0 через параметры L и W :

$$\beta_0 = \frac{1}{1 - \alpha_0} = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{2} \frac{W^2}{L^2}\right)} = \frac{2L^2}{W^2} \quad (28)$$

Среднее время диффузии дырок через базу τ_D можно определить из уравнения (29)

$$\tau_D = \frac{\tau_p}{\beta_0} \approx \tau_p (1 - \alpha_0) \quad (29)$$

Можно убедиться, что

$$\omega_\alpha = \frac{1}{\tau_D} \quad (30).$$

Из выражений (29) и (30) следует:

$$\omega_\beta = \frac{1}{\tau_p} \quad (31)$$

Из выражения (31) следует, что повышения предельной частоты усиления транзистора ω_α можно добиться путем уменьшения времени диффузии дырок через базу τ_D ; уменьшение же времени диффузии дырок через базу τ_p можно достичь сокращением ширины базы.

Порядок выполнения работы:

Измерить коэффициент усиления транзистора включенного по схеме с общим эмиттером (общим коллектором) в зависимости от частоты. Для этого измерить напряжение на входе и выходе транзистора с помощью осциллографа и найти коэффициент усиления транзистора. Измерения проводить при частоте от 1Гц до 2МГц.

Построить графики.

Определить из графиков предельную и граничную частоты транзистора.

Контрольные вопросы:

1. Какими параметрами можно характеризовать частотные свойства транзистора? Дайте определения этих параметров.
2. Как зависят коэффициенты передачи тока от частоты в схемах с ОЭ и ОБ?
3. Расскажите о коэффициентах усиления по току, напряжению и мощности в различных схемах включения БТ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Целью работы является исследование статических характеристик и основных параметров полевых транзисторов.

Полевыми (униполярными) транзисторами называются транзисторы, работа которых основана на управлении размерами токопроводящей области (канала) посредством изменения напряженности поперечно приложенного электрического поля к затвору. Проводимость канала в таких приборах определяется основными носителями заряда.

Существуют два типа полевых транзисторов: транзисторы с р-п-переходом в качестве затвора и МДП-транзисторы (транзистор с изолированным затвором). В свою очередь, МДП-транзисторы могут быть двух разновидностей: с индуцированным и встроенным каналом.

Полевые транзисторы с р-п-переходом

Простейший полевой транзистор состоит из пластинки полупроводникового материала с одним р-п-переходом в центральной части и с невыпрямляющими контактами по краям. Действие этого прибора основано на зависимости толщины области пространственного заряда (ОПЗ) р-п-перехода от приложенного к нему напряжения. Поскольку запирающий слой полностью лишен подвижных носителей заряда, его проводимость близка к нулю. Таким образом, в пластинке полупроводника, не охваченной

запирающим слоем, образуется токопроводящий канал, сечение которого зависит от толщины ОПЗ. Если включить питание, как показано на рисунке 1в, то через пластинку полупроводника между невыпрямляющими контактами потечет ток. Область в полупроводнике, в которой поток носителей заряда, регулируется приложенным напряжением, называют проводящим каналом.

Электрод полевого транзистора, на который подается электрический сигнал, используемый для управления величиной тока, протекающего через канал, называют затвором.

Затвор выполняет роль сетки вакуумного триода. Исток и сток соответствуют катоду и аноду. Величина тока в канале при E_2 и $R_n=c$ зависит от сопротивления участка пластинки между стоком и затвором, т.е. в значительной степени от эффективной площади поперечного сечения канала. Источник E_1 создает отрицательное сопротивление на затворе, что приводит к увеличению толщины запирающего слоя и уменьшению сечения канала. С уменьшением сечения канала увеличивается сопротивление между истоком и затвором и снижается величина тока I_c уменьшение напряжения на затворе вызывает уменьшение сопротивления канала и возрастание тока I_c . Следовательно, ток, протекающий через канал можно модулировать сигналами, приложенными к затвору.

Отрицательное напряжение, приложенное к затвору относительно истока, может вызывать такое расширение ОПЗ, при котором токопроводящий канал окажется перекрытым.

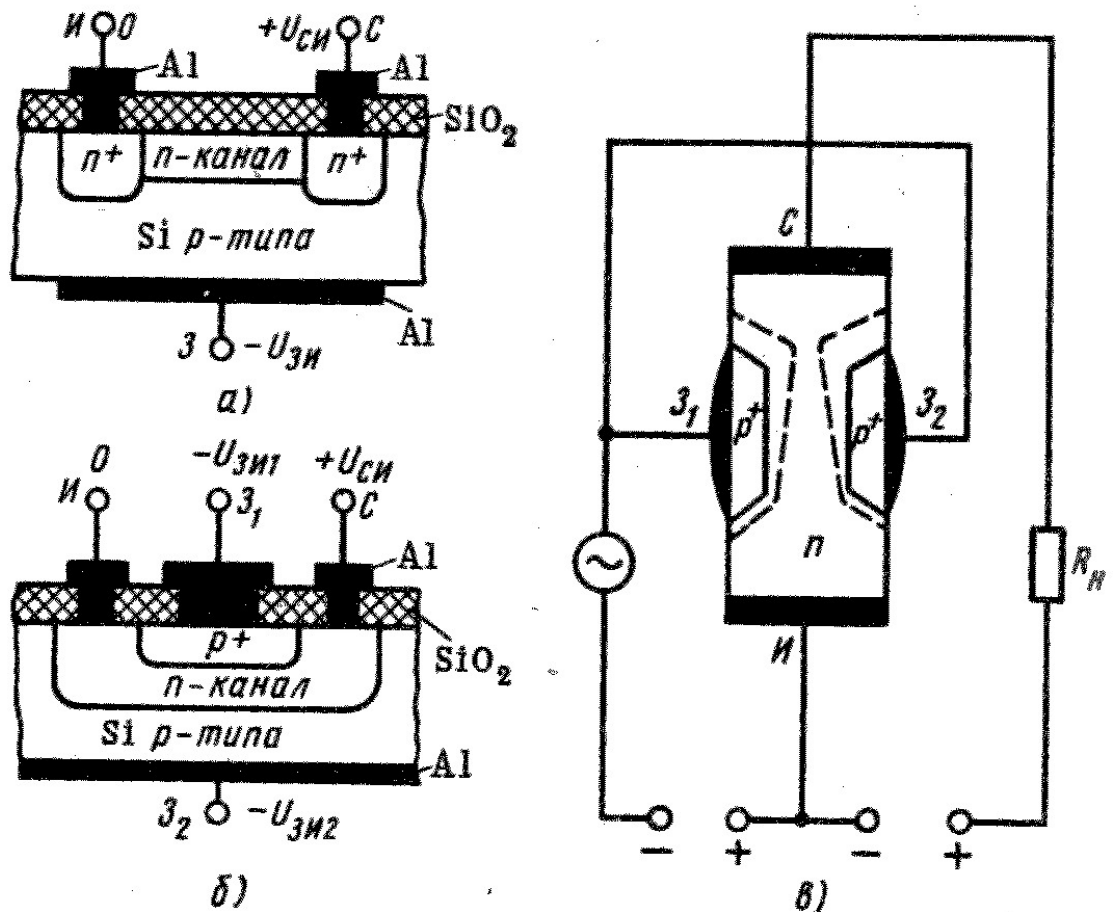


Рис. 1

К р-п-переходу приложено не только «поперечное» напряжение, но и «продольное» напряжение, падающее на распределенном сопротивлении канала, создаваемое током, протекающим от истока к стоку. Поэтому ширина ОПЗ у стока увеличивается, а эффективное сечение канала соответственно уменьшается (рис. 2).

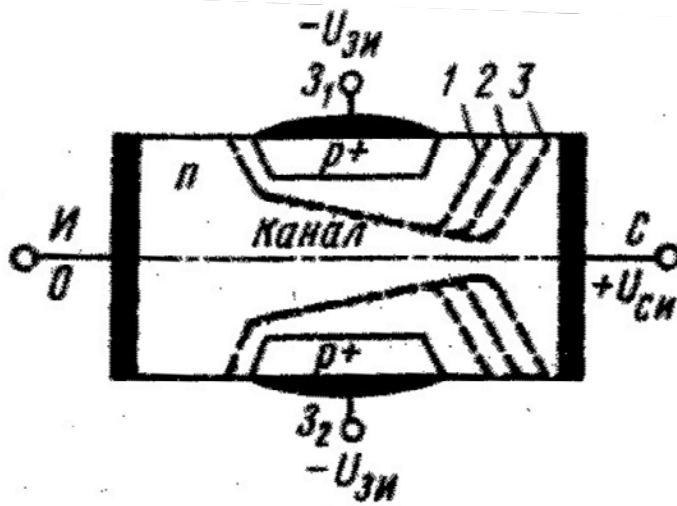


Рис. 2

Полевые транзисторы с изолированным затвором

В транзисторе с изолированным затвором металлический управляющий электрод отделен от проводящего канала полупроводника тонким диэлектрическим слоем (рис. 3 а, б). Таким образом, затвор, проводящий канал и диэлектрик образуют конденсатор. При изменении разности потенциалов между затвором и каналом на затворе накапливается заряд, который индуцирует равный по величине заряд в канале, изменяющий проводимость канала. Транзисторы с изолированным затвором чаще всего изготавливают из кремния. В качестве изолирующего слоя обычно используют слой окисла, создаваемый специальной обработкой на поверхности кремния.

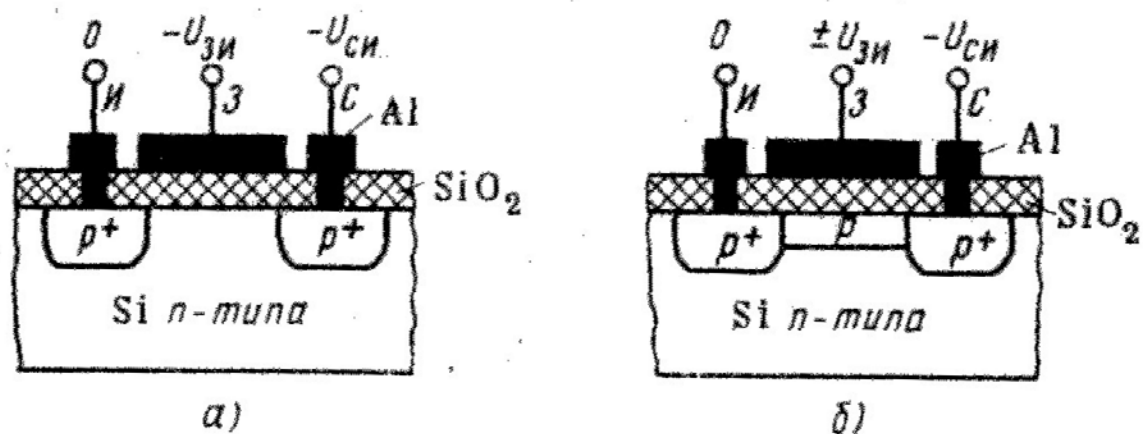


Рис. 3

МДП-транзистор является четырехполосным прибором, т.к. кроме основных электродов, определяющих работу прибора, имеется еще один – подложка (основной кристалл полупроводника). На этом электроде изготавливается МДП-структура и потенциал его влияет на работу прибора. По характеру влияния напряжения затвора на проводимость канала МДП-транзисторы делятся на транзисторы с индуцированным и встроенным каналом (рис. 3 а, б).

В транзисторе с индуцированным каналом проводящий канал отсутствует при нулевом смещении на затворе. При смещении на затворе, превышающем пороговое напряжение, проводимость канала создается за счет электростатического влияния напряжения затвора на материал подложки. Поэтому для работы транзистора с индуцированным каналом приложенное к затвору напряжение должно обеспечить инвертирование типа проводимости на поверхности подложки, обогащение канала носителями заряда, являющимися неосновными для материала подложки. Если канал имеет проводимость при отсутствии смещения (рис. 3б), то он называется встроенным. В транзисторах со встроенным каналом напряжение затвора (в зависимости от полярности) может увеличивать или уменьшать проводимость канала. Таким образом, транзисторы со встроенным каналом

могут работать как в режиме обогащения, так и режиме обеднения канала носителями.

Статические характеристики и параметры полевого транзистора с р-п-переходом в качестве затвора

Выходные характеристики

Изменение сечения канала. Рассмотрим зависимость тока стока от напряжения на стоке при постоянном напряжении на затворе (рис.4).

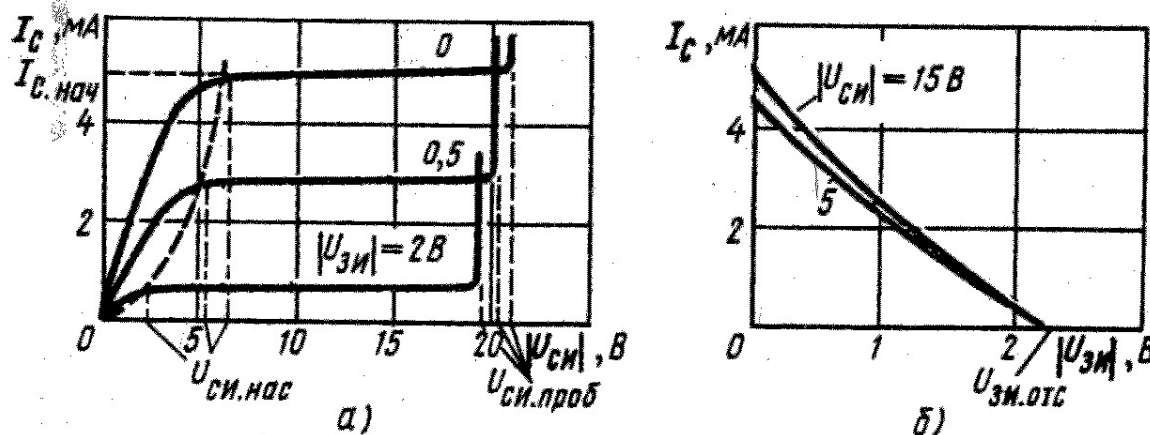


Рис. 4

На первом участке ВАХ наблюдается замедленный рост стока при увеличении напряжения на стоке от нуля до $U_{нас}$.

Нелинейность характеристики на этом участке объясняется расширением ОПЗ р-п-перехода (затвора) и соответствующим сужением канала с увеличением тока стока, проходящего по каналу и создающего его неэквипотенциальность. Наибольшее расширение ОПЗ и сужение канала происходит со стороны стока (рис. 3), т.к. там возникает наибольшая разность потенциалов между каналом и р-областью затвора.

На втором участке ВАХ ток стока почти не растет при увеличении напряжения стока. Эта область напряжений стока соответствует насыщению или перекрытию канала. Необходимо отметить, что путем увеличения

напряжения стока полного перекрытия канала, т.е. само «смыкание» областей ОПЗ со стороны стокового контакта является следствием увеличения тока стока. В результате устанавливается некоторая малая ширина канала.

Подача обратного напряжения на затвор относительно истока приводит к расширению ОПЗ р-n-перехода (затвора) и к сужению канала. Поэтому статические характеристики смещаются в область меньших токов стока. Первые участки ВАХ имеют другой наклон, соответствующий большим значениям сопротивления канала. Второй участок характеристик (участок насыщения) при обратных напряжениях на затворе начинается при меньших величинах напряжения стока, т.к. исходное сечение канала при этом оказывается меньше.

Изменение длины «перекрытой» части канала

При увеличении напряжения стока выше напряжения насыщения начинает увеличиваться длина «перекрытой» части канала. В области насыщения ток стока не зависел бы от напряжения стока при линейном росте сопротивления канала с ростом напряжения стока. Однако длина «перекрытой» части канала растет с увеличением напряжения так же, как и ширина ОПЗ р-n-перехода (затвора), т.е. слабо. Поэтому в области насыщения канала при увеличении напряжения стока наблюдается небольшой рост тока.

Изменение подвижности носителей заряда при сильном поле

При сильных электрических полях подвижность носителей заряда в полупроводниках начинает уменьшаться, т.е. скорость дрейфа носителей достигает насыщения и перестает возрастать с увеличением электрического поля. В полевом транзисторе почти все напряжение падает на короткую «перекрытую» часть канала. Поэтому второй участок статических ВАХ полевого транзистора, когда происходит насыщение, связан также с

уменьшением удельной проводимости материала канала из-за уменьшения подвижности. На первом участке характеристик влиянием этого эффекта можно пренебречь.

Изменение концентрации носителей заряда

При обратном напряжении на р-п-переходе (затворе) происходит экстракция неосновных носителей (дырок) из канала. В связи с уменьшением концентрации неосновных носителей уменьшается концентрация и основных носителей. Этот эффект также приводит к уменьшению удельной проводимости канала и к нелинейности статических характеристик.

Пробой транзистора

Пробой полевого транзистора объясняется возникновением лавинообразного процесса в р-п-переходе (затворе). Обратное напряжение на р-п-переходе (затворе) изменяется вдоль его длины, достигая максимального значения у стокового конца канала. Напряжение, приложенное к р-п-переходу (затвору) в этом месте, является суммой напряжения стока и напряжения затвора (без учета сопротивления кристалла между концом канала и стоковым контактом). В этом месте и будет происходить пробой р-п-перехода (затвора) полевого транзистора при пробивном напряжении.

$$U_{\text{проб}} = U_{\text{СИ}} + U_{\text{ЗИ}} \quad (1)$$

В соответствии с (1) пробой полевого транзистора происходит при разных напряжениях на стоке в зависимости от напряжения на затворе. Чем больше напряжение на затворе относительно истока, тем меньше напряжение стока, при котором произойдет пробой (рис. 4).

Входные характеристики

Поскольку полевой транзистор обычно работает при обратном смещении на затворе, входная статическая характеристика его при напряжении на стоке, равном нулю, представляет собой обратную ветвь ВАХ

p-n-перехода. Таким образом, входная статическая характеристика будет иметь участок насыщения затвора, если полевой транзистор сделан из материала с малой шириной запрещенной зоны. В этом случае на обратные токи через p-n-переход (затвор) будут влиять процессы генерации носителей ОПЗ. И наоборот, статические характеристики полевых транзисторов, изготовленных из материала с большой шириной запрещенной зоны, будут иметь участок насыщения тока затвора.

Характеристики передачи

Так как основным рабочим режимом полевых транзисторов является режим насыщения, то в качестве характеристики передачи представляет интерес зависимость тока насыщения от напряжения затвора.

$$I_{c \text{ нас}} = f(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = const$$

Характер этих кривых ясен из принципа действия полевого транзистора. При изменении напряжения стока смещением характеристик передачи практически можно пренебречь в связи с ничтожным изменением тока.

Крутизна характеристики

Основные параметры и усилительные свойства полевого транзистора оценивают по аналогии с известным параметром электронной лампы – крутизной характеристики передачи.

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{3U}} \right|_{U_{сУ} = const} \quad (2)$$

Численные значения этого параметра у полевых транзисторов доходят до нескольких миллиампер на вольт.

Выходное и внутреннее сопротивление

Так же как для электронной лампы, выходное сопротивление полевого транзистора определяют котангенсом угла наклона выходных статических характеристик.

$$r_{\text{вых}} = \left. \frac{dU_{CU}}{dI_C} \right|_{U_{3U}=\text{const}} \quad (3)$$

В рабочей области напряжения и токов (в режиме насыщения) угол наклона статических выходных характеристик очень близок к нулю, что свидетельствует о высоком выходном сопротивлении полевого транзистора малым переменным токам. Выходные сопротивления полевых транзисторов могут иметь численное значение от сотен кОм до нескольких МОм.

Произведение крутизны характеристики S и выходного сопротивления $r_{\text{вых}}$ дают собственный коэффициент усиления полевого транзистора по напряжению.

$$K_U = S r_{\text{вых}} \quad (4)$$

Входное сопротивление полевого транзистора определяется в основном дифференциальным сопротивлением р-п-перехода (затвора), находящегося под обратным постоянным напряжением источника питания.

$$r_{\text{вх}} = \frac{dU_{3U}}{dI_3} \quad (5)$$

Входное сопротивление может составлять для полевых транзисторов несколько МОм. Напряжение отсечки, или напряжение перекрытия – это напряжение на затворе, при котором происходит смыкание ОПЗ р-п-перехода (затвора), или перекрытие канала. Полное перекрытие канала может произойти при увеличении запирающего напряжения на затворе относительно истока.

Напряжением насыщения $U_{\text{нас}}$ называют такое напряжение стока, при котором полевой транзистор переходит в режим насыщения, т.е. ток стока почти перестает зависеть от напряжения стока (рис. 4).

Входная и проходная емкости. Входная емкость C_{3U} – это часть барьерной емкости р-п-перехода (затвора), действующая между затвором и стоком. Измеряются эти емкости при постоянном смещении. Обычно входные и проходные емкости имеют величины в несколько пФр.

Предельная рабочая частота – это частота, при которой модуль крутизны S уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Численные значения этой частоты для полевых транзисторов достигает несколько сотен МГц.

Коэффициент шумов полевых транзисторов определяют так же как для обычных транзисторов с инжекцией. Величина коэффициента шумов полевых транзисторов с р-п-переходом в качестве затвора может не превышать 2 Дб при частотах от 1КГц и выше.

Допустимая мощность рассеяния некоторых полевых транзисторов достигает 5 Вт при предельной рабочей частоте 500 МГц.

Статические характеристики и параметры полевых транзисторов с изолированным затвором

Семейство статических характеристик транзисторов

При малых значениях U_C (участок 1) I_C возрастает пропорционально U_C . Это объясняется увеличением скорости движения дырок в поле, создаваемом стоком при малых U_C .

$$v = \mu_p E = \frac{\mu U_C}{e} \quad (6)$$

При больших напряжениях $U_{\text{с,нас}}$ (участок 2) происходит уменьшение скорости возрастания I_C с ростом U_C . Это видно и связано с тем, что с ростом

U_C уменьшается падение напряжения на диэлектрике, уменьшается заряд, индуцированный затвором в канале, т.е. концентрация носителей и проводимость канала, снижение I_C .

При $U_C > U_{CU}$ не получается, т.к. при $U_C = U_{CU}$ происходит перекрытие канала у стока обедненной областью, создаваемой напряжением стока. При этом рост U_C вызывает только рост падения напряжения на обедненной области канала и не увеличивает напряженности поля в проводящей части канала. Ток I_C при этом не зависит от U_C и становится равным току насыщения I_{CU} . Изменение тока стока при изменении U_C (рис. 1а) объясняется изменением проводимости индуцированного канала, т.е. заряда Q_P .

Характеристика передачи

Рабочим участком стоковых характеристик является пологий участок, на котором ток стока эффективно управляется напряжением затвора и очень мало зависит от напряжения стока. Зависимость тока стока от напряжения затвора характеризует свойства МДП-транзистора передавать сигнал с входа на выход. Эта зависимость снимается экспериментально и называется передаточной характеристикой транзистора. Передаточная характеристика является квадратичной.

По другим характеристикам и параметрам МДП-транзисторы отличаются от полевых транзисторов с р-п-переходом еще большей величиной входного сопротивления, а также тем, что могут работать при обеих полярностях входного напряжения.

Влияние смещенной подложки на статические характеристики

Если приложить напряжение между истоком и подложкой, то происходит модуляция проводимости канала. Поэтому подложка может действовать как второй затвор МДП-транзистора. Модуляция проводимости канала осуществляется следующим образом. Между инверсионным слоем

кремния (каналом) и подложкой образуется р-n-переход. Напряжение обратного смещения этого перехода, приложенное между истоком и подложкой, увеличивает ширину р-n-перехода и увеличивает заряд обедненного слоя под каналом. При обратном смещении подложки, т.е. при наличии слоя, обедненного носителями заряда между каналом и подложкой, заряд на затворе и заряд поверхностных состояний при изменении разности потенциалов между подложкой и каналом остаются постоянными. Поэтому увеличение обратного смещения р-n-перехода канал – подложка увеличивает ширину и заряд обедненных носителей заряда и уменьшает ширину и заряд канала, а следовательно, ток стока. При этом увеличивается пороговое напряжение. Влияние изменения проводимости канала уменьшаются с увеличением удельного сопротивления материала подложки. Это объясняется тем, что в большом ρ материала подложки переход расширяется в высокоомную область подложки и мало расширяется в сторону канала. Наличие подложки в МДП-транзисторах дало возможность использовать их не только в качестве усилительных приборов, но и в качестве других специальных приборов. Например, полевой транзистор с затвором, соединенным с истоком, часто используют в качестве стабилизатора тока. В интегральных схемах на МДП-транзисторах часто необходимо использовать диод. Для этой цели может использоваться МДП-транзистор с индуцированным каналом и с затвором, соединенным со стоком.

Структурная схема установки для исследования

Исследование статических характеристик транзисторов производится на установке, структурная схема которой приведена на рис. 5. Напряжение на затворе и на стоке исследуемых транзисторов подаются от регулируемых источников постоянного напряжения. Напряжение на затворе и на стоке исследуемых транзисторов изменяются вольтметром. Ток стока измеряется амперметром.

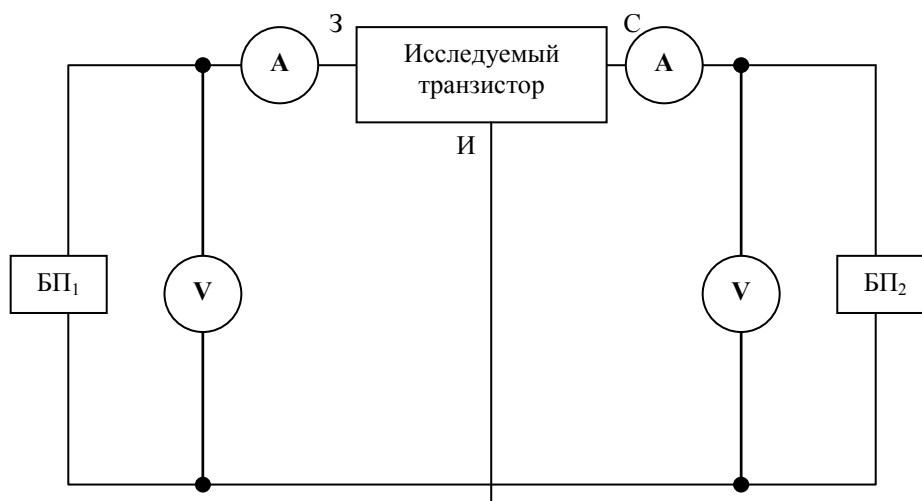


Рис. 5

Порядок выполнения исследования

а) уменьшить напряжение питания до нуля. Подключить к схеме полевой транзистор с р-п-переходом в качестве затвора и провести исследования. Напряжения на затворе устанавливать в соответствии с (табл.1). Измерять напряжение на стоке от 0 до 3 с шагом 0,5В и далее с шагом 2В до 9В и измерять ток стока.

Таблица 1.

Стоковые (статические) характеристики транзисторов с р-п-переходом в качестве затвора.

$U_3=0В$		$U_3=1В$		$U_3=3В$		$U_3=5В$	
$U_c, В$	I_c, mA	$U_c, В$	I_c, mA	$U_c, В$	I_c, mA	$U_c, В$	I_c, mA

б) снятие стоко-затворной характеристики полевого транзистора. Стоко-затворную характеристику снимают для одного значения напряжения стока, например, $U_c=-5В$. При этом изменяют напряжение затвора от 0 (при максимальном значении тока стока) до напряжения отсечки (при котором ток стока равен нулю) с шагом 0,1-0,2В.

Обработка экспериментальных результатов и расчет параметров.

1. По данным таблицы 1 построить семейство выходных статических характеристик и одну характеристику передачи при $U_c=7\text{В}$ полевого транзистора с р-n-переходом в качестве затвора.

2. Определить пороговое напряжение ($U_{\text{пор}}$) МДП-транзистора с индуцированным каналом путем экстраполяции характеристик передачи до оси напряжения на затворе при $U=0,5\text{В}$.

3. Определить напряжение отсечки ($U_{\text{отс}}$) полевого транзистора с р-n-переходом в качестве затвора путем экстраполяции характеристик передачи до оси напряжения на затворе.

4. По характеристике передачи МДП-транзистора вычислить при $U=14\text{В}$ крутизну, пользуясь формулой (2).

5. По статической выходной характеристике МДП-транзистора вычислить выходное сопротивление $U=10\text{В}$, пользуясь формулой (3).

6. По формуле (4) вычислить собственный коэффициент усиления МДП-транзистора по напряжению.

Положение переключателей на измерителе статистических параметров

Переключатель	Положение переключателя
“Параметры”	“ J_c ”
“ E_3 ”	“-”
“ E_c ”	“+”
“ E_n ”	“+”

Положения E_3 , E_c , E_n соответствуют транзисторам типа КП302, КП303. Для транзистора типа КП301 напряжение на Стоке относительно Истока и подложки - отрицательное, на Затворе - тоже отрицательное.

Положения остальных переключателей на измерителе статических параметров, а также показания индикатора на данном блоке не имеют значения и не используются в данной работе.

Блок режимов (назначение индикаторов и переключателей) Индикатор "mA" показывает значение тока стока (J_c)

Индикатор "V" показывает значение напряжения на Затворе, Подложке или Стоке (а зависимости от того, в каком положении стоит переключатель "E": " E_3 ", " E_n " или " E_c " соответственно).

Переключатель " J_c " изменяет пределы измерения тока стока.

Переключатели " E_3 ", " E_n " или " E_c " изменяют пределы измерения напряжений Затвора, Подложки или Стока соответственно.

Регуляторы, расположенные под переключателями " E_3 ", " E_n " и " E_c " можно менять соответствующие напряжения.

Рычагом с надписью "Измерение" прибор переводят в режим измерения.

Передаточная характеристика ПТ представляет собой зависимость тока стока от напряжения на Затворе относительно Истока.

На Блоке режимов меняют соответствующим регулятором напряжение на Затворе от 0 до некоторого значения $U_{отс}$, при котором ток Стока становится практически равным нулю. Шаг выставляемых значений на Затворе ПТ нужно выбрать таким, чтобы изменение тока Стока носило плавный характер. Значения $U_{зи}$ и соответствующие им значения J_c заносят в таблицу.

Измерения проводят при двух различных постоянных напряжениях на Стоке транзистора. Строят графики полученных зависимостей.

Выходная характеристика ПТ представляет собой зависимость тока стока от напряжения на Стоке относительно Истока.

На Блоке режимов меняют соответствующим регулятором напряжение на Стоке от 0 до некоторого значения, при котором ток Стока практически перестает увеличиваться с увеличением напряжения на Стоке. Шаг выставляемых значений на Стоке ПТ нужно выбрать таким, чтобы изменение тока Стока носило плавный характер. Значения $U_{си}$ и соответствующие им значения J_c заносят в таблицу. Измерения проводят при постоянном напряжении на Затворе равном нулю и двум другим, отличным от нуля, значения (порядка 1-2В). Строят графики полученных зависимостей.

Крутизна характеристики ПТ численно равна отношению ΔU к ΔI_c имеет размерность [mA/V]. Данный прибор позволяет сразу определить ее значение при частотах 100МГц, 250МГц или 400МГц. Предварительно необходимо выставить на приборе нужные полярности напряжений, подаваемые на выводах ПТ:

Переключатель	Положение переключателя
“Параметры”	“ J_c ”
“ E_3 ”	“-”
“ E_c ”	“+”
“ E_n ”	“+”

Перед каждым измерением следует проводить калибровку прибора. Для этого нужно:

1. Переключатель "Измерение-Калибровка" поставить в положение "Калибровка".
2. Переключателем частот выставить ту частоту, при которой будут проводиться измерения крутизны ПТ.

3. Переключатель "mA/V" поставить в положение "100МГц; 250МГц" (если измерения будут проводиться при таких частотах), либо в положение "400МГц" (если измерения будут проводиться при такой частоте).
4. Регуляторами "Калибровка", "Установка 0" и "Подстройка" установить нулевое значение показания стрелочного прибора.

После калибровки можно проводить измерения крутизны характеристики данного ПТ. Для этого нужно:

1. Переключатель "Измерение-Калибровка" поставить в положение "Измерение"
2. Переключатель "mA/V" поставить в положение 1,3,10 или 30 (предел измерения крутизны характеристики выбирается таким образом, чтобы стрелка прибора находилась во второй области шкалы).
3. Рычагом с надписью "Измерение" прибор переводят в режим измерения и записывают значение крутизны характеристики ПТ по показанию стрелочного прибора.

Контрольные вопросы

1. Что называется полевым транзистором?
2. Объясните конструктивные особенности и принцип действия полевого транзистора с р-n-переходом в качестве затвора и с изолированным (индуцированным и встроенным каналами) затвором.
3. Начертите схему включения полевого транзистора с указанием полярности источников напряжения в цепи затвора и стока.
4. Чем объяснить высокое входное сопротивление полевого транзистора по сравнению с биполярными транзисторами.
5. Какие носители заряда (основные или неосновные) участвуют в создании тока.

6.Объясните ход статических характеристик передачи различных полевых транзисторов.

7.Перечислите основные параметры полевого транзистора и способы их определения по характеристикам.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЛОМОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ДИОДОВ

Цель работы:

1.Изучить работу измерителя статических параметров маломощных транзисторов и диодов Л2-70 и его предназначений.

2 Снять статические параметры маломощных транзисторов типа МП 21, МП 26, МП 37, КТ 315, а также маломощных диодов типа Д 226, Д 220.

Коэффициентом выпрямления диода называется отношение прямого тока к обратному, при равных значениях приложенного прямого и обратного напряжения.

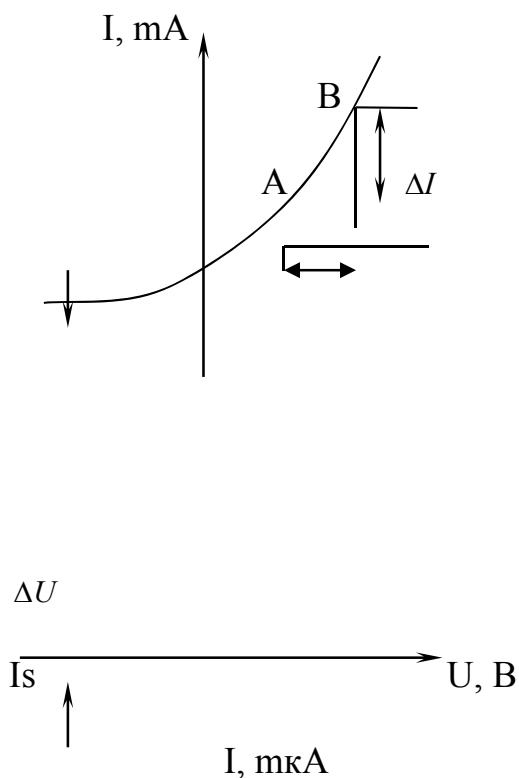


Рис.1

Дифференциальным сопротивлением диода называется сопротивление малому переменному току при неизменном (постоянном) смещении. По экспериментальной ВАХ (рис.1) определяется как:

$$g = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI} \quad (1)$$

За время жизни до перехода некоторые неосновных носителей заряда, находящиеся в р- и n- областях на расстоянии до р-n-перехода не превышающем соответствующей диффузионной длины успевают дойти до р-n-перехода, а остальные находящиеся на большем расстоянии не доходят до р-n-перехода и рекомбинируют в объеме диода, т.е. р- и n- областях.

Это возможно при некоторых значениях обратного напряжения. При некоторых очень малых значениях обратного напряжения ток перехода либо не изменяется, либо изменяется очень медленно. Такой ток называется током насыщения.

Малосигнальные параметры

Если переменные напряжения на переходах транзистора достаточно малы, токи в нем оказываются линейными функциями этих напряжений. Транзистор можно рассматривать как линейный четырехполюсник (рис.2).

Чтобы показать связь между величинами \dot{U}_1 и \dot{U}_2 , \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , составим шесть систем уравнений. Однако практически применяются только три системы. В первой из них напряжения рассматриваются как линейные функции токов:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_{11} \dot{I}_1 + Z_{12} \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= Z_{21} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты Z_{iK} , имеющие размерность сопротивления и являющиеся комплексными, можно выразить через токи и напряжения, измеряемые в режиме холостого хода., следующим образом:

$$Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0} ; \quad Z_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0}$$

$$Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0} ; \quad Z_{22} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} \quad (3)$$

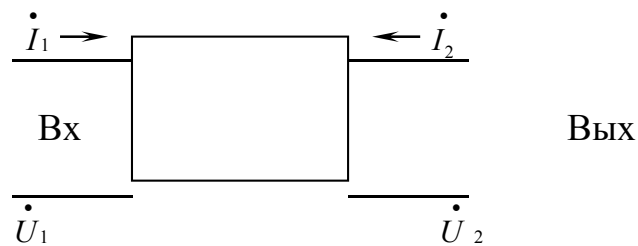


Рис.2. Четырехполюсник, эквивалентный транзистору.

Для получения режима холостого хода в цепь включают сопротивление, значительно большее, чем соответствующее сопротивление четырехполюсника (входное или выходное). При экспериментальном определении параметров транзистора необходимо обеспечить питание его электродов постоянным напряжением либо через очень большое активное сопротивление от достаточно высоковольтного источника питания, либо через индуктивные элементы.

Осуществление режима холостого хода в цепи эмиттера или базы не представляет особого труда, так как внутреннее сопротивление открытого перехода мало, а создание режима холостого хода в цепи коллектора

(выходной) затруднено тем, что внутреннее сопротивление при этом очень велико. Следовательно, определить экспериментально Z-параметры транзистора трудно.

Если токи транзистора рассматривать как линейные функции напряжений, получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= y_{11}\dot{U}_1 + y_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= y_{21}\dot{U}_1 + y_{22}\dot{U}_2 \quad (4) \end{aligned}$$

Коэффициенты Z_{ik} , имеющие размерность проводимости и тоже комплексные, определяем в режиме короткого замыкания:

$$\begin{aligned} y_{11} &= \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} ; & y_{12} &= \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \\ y_{21} &= \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} ; & y_{22} &= \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad (5) \end{aligned}$$

Режим короткого замыкания можно легко осуществлять в цепи коллектора, где внутреннее сопротивление транзистора велико. Выполнение режима короткого замыкания в цепи эмиттера затруднено, особенно в области низких частот. Это ограничивает применение y – параметра для описания свойств транзистора.

Во избежание перечисленных трудностей чаще всего для описания свойств транзистора используют так называемую смешанную систему:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2 \quad (6) \end{aligned}$$

Для определения h – параметров необходимы режим короткого замыкания в выходной цепи и режим холостого хода во входной цепи.

$$h_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad (7) \quad - \text{ входное сопротивление при коротком}$$

замыкании выходной цепи;

$$h_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} \quad (8) \quad - \text{ коэффициент обратной связи по напряжению при}$$

холостом ходе во входной цепи;

$$h_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad (9) \quad - \text{ коэффициент передачи тока при коротком}$$

замыкании выходной цепи;

$$h_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} \quad (10) \quad - \text{ выходная проводимость при холостом ходе во}$$

входной цепи.

Статические параметры

Параметры активного режима. К этим параметрам относится статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером:

$$h_{21Э} = \beta = \frac{I_K - I_{КБ0}}{I_B + I_{КБ0}} \quad (11)$$

Статический коэффициент передачи тока эмиттера в схеме с общей базой:

$$h_{21Б} = \alpha = \frac{I_K - I_{КБ0}}{I_{\text{Э}}} \quad (12)$$

Иногда используется значение крутизны передаточной характеристики:

$$S = \frac{I_K - I_{КБ0}}{U_{\text{ЭБ}}} \quad (13)$$

Параметры режима насыщения. В качестве режимов насыщения обычно принимают измеренные при определенных токах значения падения напряжения между выводами транзистора. Например, УКБ нас – падение напряжения между выводами коллектора и базы в режиме насыщения (для схемы с общей базой) или УКЭ нас - падение напряжения между выводами коллектора и эмиттера в режиме насыщения (для схемы с общим эмиттером).

Параметры режима отсечки. В качестве статических параметров, характеризующих режим отсечки, обычно выбирают значения токов эмиттера и коллектора. В связи с тем, что в режиме отсечки наблюдается некоторое влияние одного перехода транзистора на другой, эти токи находят при определенных условиях включения.

Порядок выполнения работы

1. Для установления рабочих режимов измерителя перед работой необходимо его прогреть в течении 15мин. С момента включения тумблера СЕТЬ. После прогрева вставьте адаптер (с транзистором или диодом). Для предотвращения возможного самовозбуждения в адаптерах предусмотрены специальные цепи развязки, обход которых не допускается.

2. Измерение обратных токов $I_{\text{сво}}$, $I_{\text{Ево}}$, $I_{\text{сЕ R}}$, I_{R} .

2.1 нажмите кнопку $I_{\text{сво}}$, $I_{\text{Ево}}$, $I_{\text{сЕ R}}$, I_{R} . Соответственно на лицевой панели блока измерительного;

2.2 установите требуемую величину напряжения U_c , с помощью декадного переключения “ U_c 0,5-199,9” на лицевой панели блока измерительного; измерения проводить от 0,1В до 0,9В

2.3 установите движковый переключатель р-п-р, п-р-п, диоды в положение, соответствующее типу и проводимости измеряемого полупроводникового прибора;.

3. Измерение напряжений насыщения U_{BEsat} , U_{BEsat} , прямого напряжения диода U_F :

3.1 нажмите соответствующую кнопку U_{BEsat} , U_{BEsat} , U_F на лицевой панели блока измерительного;

3.2 установите требуемые значения токов I_c , I_B (для транзисторов), I_F (для диодов), кодовыми переключателями на лицевой панели блока измерительного;

3.3 выполнение операции 2.3 п

4. Измерение статического коэффициента передачи тока I_{h21E} , малосигнального коэффициента передачи тока I_{h21e} .

4.1 нажмите соответственно кнопку I_{h21E} или I_{h21e} на лицевой панели блока измерительного,

4.2 установите требуемое значение коллекторного напряжения U_c и тока эмиттера I_E , с помощью соответствующих кодовых переключателей на лицевой панели блока измерительного,

4.3 выполните операции 2.3 п

Примечание. В случае появления индикации “!” или “! $=\infty$ ” на лицевой панели блока режимов в результате измерения недействителен. Индикация “!” указывает на короткое замыкание или обрыв между выводами транзистора. Индикация “! $=\infty$ ” указывает на перегрузку источника

напряжения, вызванную неправильной установкой режима измерения или выходом из строя транзистора во время измерений. Измерение возможно после устранения неисправности подключения транзистора или устранения причин перегрузки источника напряжения.

Таблица №1

<u>Тип приб.</u>	<u>Материал, структуры.</u>	$U_{кбо}$ проб $U_{кэR}$ проб $U_{кэо}$ проб (В)	$U_{эбо}$ проб (В)	$Y_{кmax}$ (мА)	$Y_{кбо}$ $Y_{кэр}$ (мкА)	h_{21e} $h_{21б}$
<u>МП21</u>	<i>Ge, p-n-p</i>	40	40	300	\leq 50(40В)	20-100 (5В;25мА)
<u>МП25</u>	<i>Ge, p-n-p</i>	40	40	300	\leq 75(40В)	13-25 (20В;2,5мА)
<u>МП26</u>	<i>Ge, p-n-p</i>	70	70	300	\leq 75(70В)	25-50 (35В;1,5мА)
<u>МП37</u>	<i>Ge, n-p-n</i>	15	-	20(150)	\leq 30(5В)	15-30 (5В;1мА)
<u>КТ315</u>	<i>Si, n-p-n</i>	25	-	100	\leq 0,5(10В)	30-120 (10В;1мА)

Таблица №2

<u>Тип приб.</u>	<u>материал</u>	$U_{пр}$ (В)	$Y_{пр}$ (мА)	$Y_{обр}$ (мкА)	$U_{обр}$ (мкА)
<u>Д209</u>	<i>Si</i>	1	100	200	400
<u>Д226</u>	<i>Si</i>	1	300	300	200
<u>Д220</u>	<i>Si</i>	1	50	50	100

Контрольные вопросы

1. Что называют коэффициентом выпрямления диода и током насыщения?
2. Определите по экспериментальной ВАХ дифференциальное сопротивление диода.
3. Малосигнальные параметры транзистора, h – параметры, их преимущество по сравнению с z и y – параметрами.
4. Основные параметры БТ при различных режимах (отсечки, активном и насыщения).
- 5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМЫХ ТИРИСТОРОВ ТИПА *P-N-P-N*

Цель работы: изучение вольтамперных характеристик четырехслойных диодов типа *p-n-p-n*, а также их зависимости от температуры.

*Одним из важнейших направлений радиоэлектроники является развитие средств автоматики и вычислительной техники, основы которых составляют ключевые схемы с двумя устойчивыми или квазиустойчивыми состояниями равновесия (триггеры, мультивибраторы, токовые переключатели и т.д.). Такие схемы требуют обычно наличия не менее двух активных элементов (электронных ламп, транзисторов) и относительно большого числа пассивных элементов. Использование полупроводниковых приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением привело к значительному упрощению этих схем. Одним из таких полупроводниковых приборов, появившихся в последние годы, является четырехслойный диод типа *p-n-p-p*.*

Принцип действия *p-n-p-n* диода

На рис.1 показана структура (а) и вольтамперная характеристика (б) четырехслойного диода типа р-п-р-п.

Рассмотрим физические процессы и закономерности, определяющие характер изменения тока I , протекающего через четырехслойную структуру, в зависимости от приложенного к ней напряжения U .

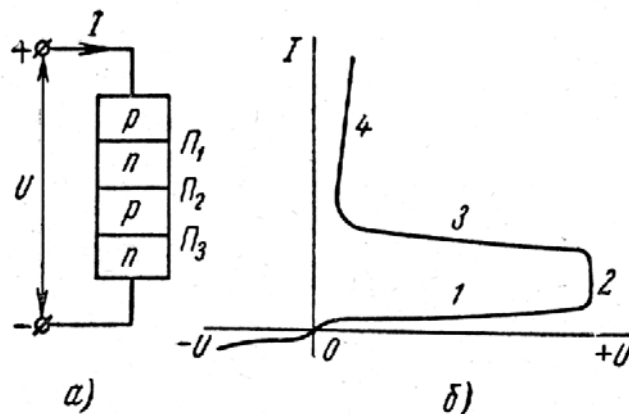
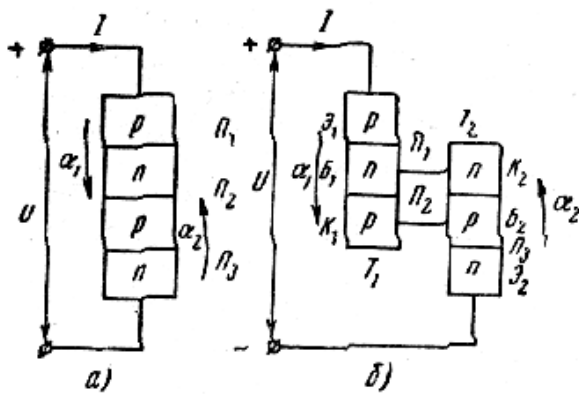


Рис.1. Структура (а) и вольтамперная характеристика (б) четырехслойного диода типа р-п-р-п

Переходы Π_1 и Π_2 будем называть далее эмиттерными переходами, соответственно внешние р- и п- области, к ним примыкающие, - эмиттерными. Центральный р-п Π_2 назовем коллекторным. Внутренние р- и п-области структуры назовем базами. Пусть напряжение U приложено к структуре р-п-р-п, как показано на рис. 1а. При этом эмиттерные р-п переходы будут смещены в прямом направлении и коллекторный р-п переход - в обратном направлении. Внешнее напряжение U в этом случае считается положительным, а при обратной полярности отрицательным.

Для общей наглядности представим р-п-р-п переход в виде комбинации двух транзисторов, соединенных между собой как показано на рис. 2б. При положительном смещении эмиттеры инжектируют неосновные носители: дырки - в область базы первого транзистора, электроны - в область базы второго транзистора. Через коллекторные переходы обоих транзисторов должны протекать токи:



$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \alpha_1 I_{\beta 1}; \\ I_2 &= \alpha_2 I_{\beta 2}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $I_{\beta 1}$ и $I_{\beta 2}$ - токи через эмиттерные переходы Π_1, Π_3 ; α_1, α_2 - коэффициенты передачи тока соответствующих транзисторов, определяемые здесь как отношение

Рис.2. Структура (а) четырехслойного диода типа р-п-р-п и его транзисторный эквивалент (б)

тока неосновных носителей в базе, границы коллекторного перехода, к полному току через эмиттерный

переход (как принято, генерацией и рекомбинацией носителей в запиорном слое коллекторного перехода пренебрегаем).
В данном случае ток через коллекторные переходы, включенные параллельно, равен сумме токов I_1 и I_2 и токов насыщения и утечки через коллекторные переходы, которые также представим, как некоторый суммарный ток $I_{\beta 0}$. Очевидно, что

$$I_{\beta 1} = I_{\beta 2} = \alpha_1 I_{\beta 1} + \alpha_2 I_{\beta 2} + I_{\beta 0} = I. \quad (2)$$

Это же соотношение должно иметь место и для р-п-р-п структуры при приложении к ней прямого смещения.

Преобразуя выражение (2), найдем, что ток, протекающий через четырехслойную структуру, при прямом смещении на ней

$$I = \frac{I_{\beta 0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{I_{\beta 0}}{1 - \alpha}, \quad (3)$$

где под α понимается суммарный коэффициент передачи обоих транзисторов, образующих структуру р-п-р-п.

Известно, что при малых токах эмиттера коэффициент передачи уменьшается с уменьшением тока, особенно в кремниевых транзисторах. В

четырёхслойной структуре на кремнии, где существенную роль может играть генерация и рекомбинация в запирающем слое, суммарный коэффициент передачи тока при малой плотности эмиттерного тока может быть много меньше единицы. При этом ток через структуру также будет мал (область 1 вольтамперной характеристики рис. 1б). Однако с ростом напряжения ток $I_{к0}$ через коллекторный переход увеличивается.

Рост обратного тока коллекторного перехода обусловлен рядом причин, из которых рассмотрим наиболее существенные. Прежде всего, всегда имеется некоторый ток утечки, пропорциональный напряжению на переходе. С увеличением напряжения расширяется запирающий слой, что вызывает при наличии генерации носителей в запирающем слое увеличение тока через переход. Наконец, при достаточно высоких напряжениях напряженность поля в переходе становится настолько большой, что электрон и дырка, попадающие в запирающий слой, могут приобрести энергию, достаточную для ударной ионизации атомов решетки кристалла. Возникает пара - электрон и дырка. Ток через переход растет, коэффициент M , отношение тока, протекающего через переход при обратном смещении, к току неосновных носителей, доходящих до перехода, может быть представлен в виде

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{пр}}\right)^n}, \quad (4)$$

где U -приложенное к переходу напряжение; $U_{пр}$ - пробивное напряжение коллекторного перехода; n - некоторый коэффициент, зависящий от материала и степени легирования р- и n-областей полупроводника.

Итак, с ростом напряжения на диоде ток через него возрастает, суммарный коэффициент α увеличивается. Как видно из уравнения (4), при α , стремящемся к единице, начинается значительный рост тока через диод (область 2 вольтамперной характеристики, рис.1,б). Увеличение тока в свою

очередь приводит к дальнейшему росту α . Напряжение на четырехслойном диоде падает (область 3) и прибор из запертого состояния переходит в открытое (область 4). Действие его аналогично действию газоразрядной лампы, хотя физические процессы в этих приборах совершенно различны. В открытом состоянии четырехслойный диод имеет малое сопротивление, и ток через него ограничивается внешним сопротивлением.

При отрицательном напряжении вольтамперная характеристика четырехслойного диода аналогична обратной ветви вольтамперной характеристики двух диодов, включенных последовательно (рис. 1б).

Таким образом, вид вольтамперной характеристики четырехслойного диода зависит от одновременного действия нескольких процессов. Это затрудняет нахождение аналитического выражения вольтамперной характеристики четырехслойного диода.

Вольтамперную характеристику четырехслойного диода можно объяснить, рассматривая процессы в четырехслойной структуре как рекомбинационное взаимодействие основных и неосновных носителей в базовых областях прибора.

Из выражения (3) следует, что ростом тока I через диод ток I_{k0} должен достигать максимума, если α при этом монотонно возрастает. Очевидно, что обратный коллекторный ток должен достигнуть максимума до того, как α достигнет единицы. При $\alpha=1$ ток I_{k0} должен быть равен нулю. Так как ток I_{k0} вообще можно считать пропорциональным обратному напряжению на переходе, то уменьшению I_{k0} с ростом общего тока через диод должно соответствовать уменьшение напряжения на коллекторном переходе. Появляется участок вольтамперной характеристики с отрицательным сопротивлением (область 3 на рис. 1б).

Для лучшего понимания процессов протекающих в четырехслойном диоде, осуществим графическое построение его прямой ветви вольтамперной

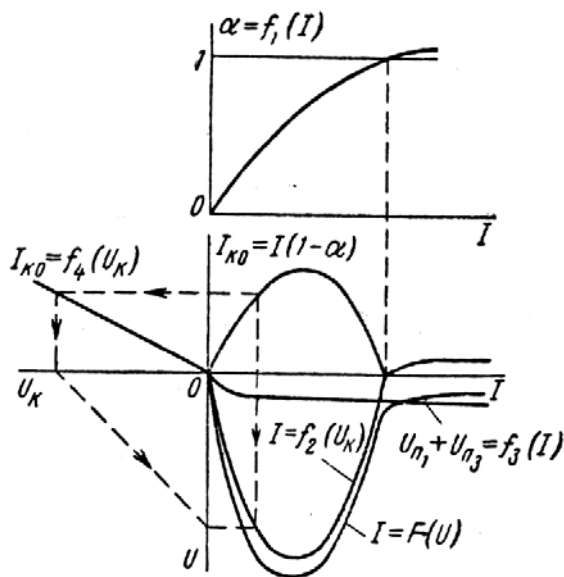


Рис.3. Графическое построение вольтамперной характеристики четырехслойного диода типа $p-n-p-n$

учитывая падение напряжения на эмиттерных переходах, получаем вольтамперную характеристику $I=F(U)$, аналогичную реально наблюдаемым характеристикам четырехслойных диодов.

характеристики $I=F(U)$, считая, что нам известны зависимости $\alpha=f_1(I)$; $I_{k0}=f_4(U_k)$; $U_{n1}+U_{n3}=f_3(I)$. Пусть эти зависимости имеют вид, показанный на совмещенном графике рис.3.

Из зависимости $\alpha=f_1(I)$ можно найти зависимость $I_{k0}=f_4(U_k)$ определяемое напряжением на коллекторном переходе, которым соответствуют данные значения I_{k0} . Нанося найденные значения напряжения в зависимости от I и

Основные параметры четырехслойного диода

За основные параметры диода (рис.4) принимают следующие.

1. Максимальное прямое напряжение на диоде, называемое напряжением включения $U_{вкл}$ и определяемое как напряжение, при котором $\frac{\partial U}{\partial I}=0$.

2. Ток включения $I_{вкл}$ определяемый как максимальный прямой ток через диод в закрытом состоянии при $\frac{\partial U}{\partial I}=0$.

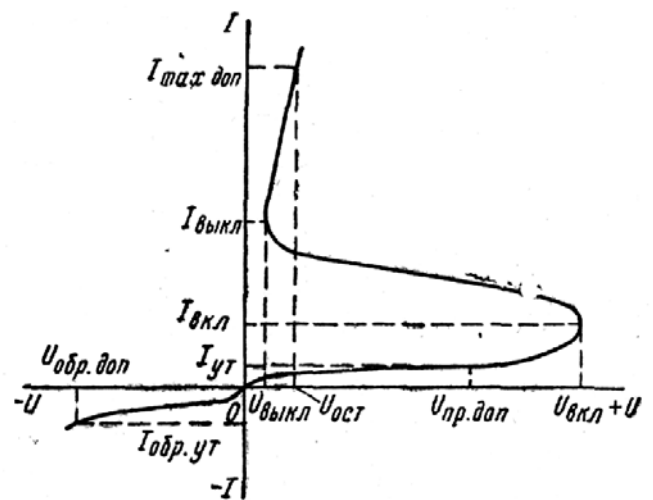


Рис.4. Вольтамперная характеристика и основные параметры четырехслойного диода типа $p-n-p-n$

3. Минимальное входное напряжение на диоде в открытом состоянии, при котором $\frac{\partial U}{\partial I} = 0$, называемое напряжением выключения

$U_{\text{выкл.}}$

4. Ток выключения $I_{\text{выкл.}}$, который характеризуется минимальным значением тока через диод, находящийся в открытом состоянии.

5. Остаточное напряжение $U_{\text{ост.}}$, т.е. падение напряжения на диоде в открытом состоянии при максимально допустимом токе через диод $I_{\text{max доп.}}$ *

6. Ток утечки $I_{\text{ут.}}$, соответствующий прямому предельно-допустимому напряжению $U_{\text{обр. доп.}}$

7. Ток утечки в обратном направлении $I_{\text{обр.ут.}}$, соответствующий отрицательному предельно-допустимому напряжению $U_{\text{обр. доп.}}$

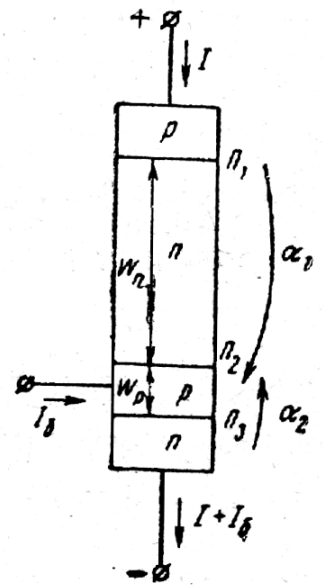


Рис.5. Структура управляемого четырехслойного диода типа p-n-p-n

Управляемые четырехслойные диоды

Из графического построения вольтамперной характеристики четырехслойного диода, показанного на рис.3, можно сделать ряд выводов о способах изменения характеристики и параметров диода. В частности, изменение зависимости $\alpha = f_1(I)$, при прочих неизменных условиях, привело бы к изменению напряжения включения и других параметров диода.

Если осуществить невыпрямляющий контакт с одной из базовых областей четырехслойного диода, то, подавая небольшое положительное смещение на соответствующий эмиттерный переход, можно изменять ток, протекающий в одном из составляющих транзисторов, и тем самым ток через диод и зависимость α от общего тока. Это приведет к изменению напряжения включения и даст возможность управлять параметрами диода, меняя смещение на управляющем электроде. Для уменьшения величины

управляющего тока, являющегося рекомбинационным током, необходимо повысить коэффициент переноса для составляющей базы, т.е. сделать ее тонкой (ширина базы W_p должна быть много меньше диффузионной длины электронов L_n). На рис.5 схематически показана такая четырехслойная структура с управляющим электродом.

Полагая в этом случае, что $\alpha_1 \ll 1$ (например, $W_n \gg L_p$), а $\alpha_2 \approx 1$, можно записать, что ток через коллекторный переход Π_2

$$\alpha_1 I + I_{b0} + (I + I_{\dot{x}}) \alpha_2 = I \quad (10)$$

Отсюда

$$I \cong \frac{I_{b0} + I_{\dot{x}}}{1 - \alpha_2} \cong (I_{b0} + I_{\dot{x}}) \beta_2, \quad (11)$$

где β_2 -значение коэффициента передачи тока структуры n-p-n при включении ее по схеме с общим эмиттером.

Полученное приближенное выражение указывает на быстрый рост тока через четырехслойный диод с ростом управляющего тока базы, поскольку величина коэффициента передачи тока сама является функцией тока и растет с его увеличением. Определяющим и в этом случае является суммарное значение коэффициента передачи тока $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$.

Наличие тока базы I_b принципиально не меняет существа процессов, определяющих вид вольтамперной характеристики четырехслойного диода,

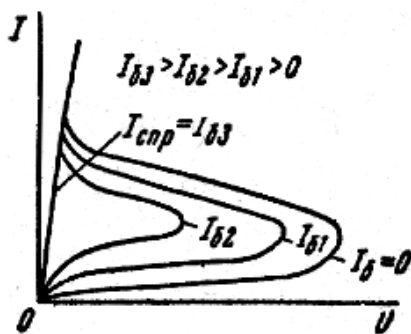


Рис.6. Семейство вольтамперных характеристик управляемого четырехслойного диода типа p-n-p-n

но меняет значения параметров, характеризующих свойства прибора.

На рис.6 представлено семейство вольтамперных характеристик управляемого четырехслойного диода, полученное для различных токов I_b через управляющий электрод. При некотором критическом

значении тока базы, называемом током спрямления $I_{спр}$, исчезает участок с неотрицательным сопротивлением, прибор включается, минуя запертое состояние. В этом случае уже при малом общем токе через четырехслойный диод суммарное значение α достаточно велико.

Задание

1. Снять семейство вольтамперных характеристик кремниевого управляемого р-n-p-n диода $U=f(I)$ при $I_б=const$. Токи базы устанавливаются по заданию преподавателя.
2. По полученному семейству вольтамперных характеристик построить $U_{вкл}=f_1(I_б)$, $I_{вкл}=f_2(I_б)$, $I_{выкл}=f_3(I_б)$.
3. Снять зависимость $U_{вкл}=f_4(T)$ диода при $I_б=0$ в интервале температур 20-120 °С.

Порядок выполнения работы

Исследование ВАХ динистора

1. Переключатель “тиристор \leftrightarrow динистор” включить в положение “динистор”.
2. Подсоединить источник питания Б5-50, согласно полярности, указанной на стенде $U_{ак}$.
3. Подключить вольтметр и амперметр.
4. Поставить на источнике питания 10В и записать текущее значение тока и напряжения с подключенных приборов.
5. Снимать значения U и I до 50В с шагом 10В после этого от 50В – до 60В с шагом 1В, затем, уменьшая напряжение шагом 1В, снимают значение U и I пока динистор не выключится.
6. Построить график зависимости $I=I(U)$.

Исследование ВАХ тиристора

1. Переключить тумблер “тиристор \Leftrightarrow динистор” в положение “тиристор”.
2. На клеммы $U_{ак}$ подать напряжение с источника питания Б5-50 10В (соблюдайте полярность).
3. На клеммы $U_{уэ}$ подать напряжение с Блока питания “2” (исходное) 7,9В; 8,1В; 8,3В.
4. Подключить вольтметр и амперметр.
5. Фиксировать текущие значения напряжения и тока. Изменяя напряжение на блоке питания 1 от 10 до 80В шагом 10В до 60В с 60В до 80 шагом 1В.
6. Построить график ВАХ.

Контрольные вопросы

1. Что такое тиристор? Какие бывают тиристоры?
2. *Структура и принцип действия диодного тиристора.*
3. ВАХ и энергетические диаграммы диодного тиристора.
4. В чем преимущество триодного тиристора перед диодным?
5. Способы управления тиристорами.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Цель работы: Изучение принципа действия, особенности работы туннельного диода (ТД), снятие вольт-амперной характеристики ТД при комнатной температуре и при температуре жидкого азота и определение параметров ТД.

Туннельный диод - это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике при прямом напряжении участка с отрицательной дифференциальной проводимостью.

1. Туннельный эффект в электронно-дырочных переходах

Туннельный эффект - важное физическое явление, которое можно объяснить на основе волновых свойств частиц и которое заключается в следующем: если электрон, движущийся с энергией в вакууме встречает потенциальный барьер высотой, то согласно классическим представлениям при преодолении электроном барьера невозможно. В квантовой механике при определенных размерах потенциального барьера появляется определенная вероятность преодоления электроном этого барьера без изменения энергии. В квантовой механике получена формула для прохождения электрона потенциального барьера путем туннельного эффекта в виде:

$$D = D_0 \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_0^L \sqrt{2m_0 [W_n(x) - W]} dx \right] \quad (1)$$

где D - коэффициент, зависящий от формы барьера, и слабо зависящий от высоты; 0 и L - границы барьера.

В туннельных р-п - переходах в сочетании с явлениями, происходящими в обычных р-п - переходах, имеет место туннельный эффект. Возможность существования туннельного эффекта в р-п - переходах впервые была высказана советским физиком Френкелем Я.И. Сущность туннельного

эффекта в р-п - переходе состоит в том, что если приложенное к переходу внешнее электрическое поле является достаточно сильным, то имеется вероятность переходов электронов с энергетических уровней в валентной зоне на уровни с той же энергией в зоне проводимости. В этом случае для определения вероятности такого туннельного перехода пользуются упрощенной энергетической зонной диаграммой (Рис. 1), считая, что для плоских диодов потенциальный барьер имеет треугольную форму. Для перехода электрона из валентной зоны (точка O) в зону проводимости (точка L), он должен преодолеть потенциальный барьер, высота которого изменяется по закону: $E_y - eE_x$, где E_x - напряженность электрического поля, E_y - ширина запрещенной зоны. Вероятность такого перехода определяется формулой:

$$D = D_0 \exp \left[-\frac{2}{h} \int_0^l \sqrt{2m_0(E_y - eE_x)} dx \right] \quad (2)$$

где $2m_0$ - комбинация эффективных масс принимая во внимание, что в точке $X=L$ имеет место (1.3), получим:

$$eE_x - E_y \quad (3)$$

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{e\sqrt{2}}{3} * \frac{\sqrt{m}}{h} * \frac{E_y^{3/2}}{eE_x} \right) \quad (4)$$

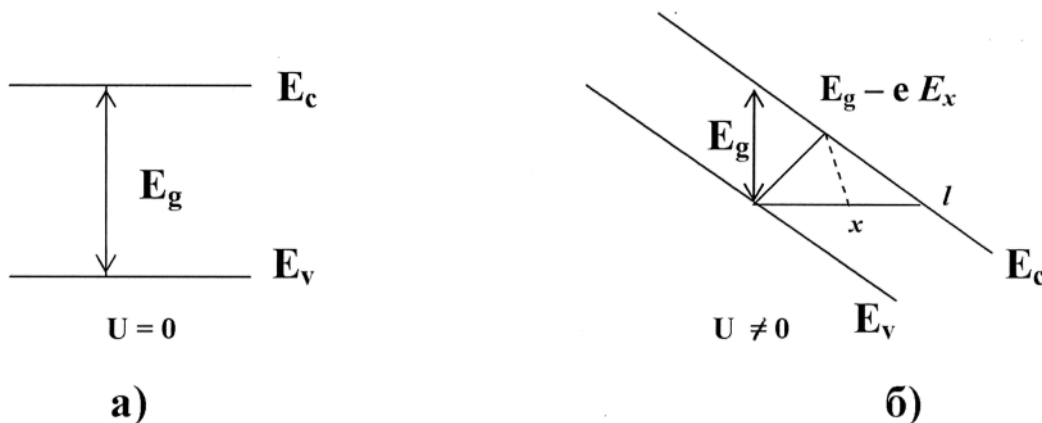


Рис. 1. Энергетическая зонная диаграмма полупроводника, иллюстрирующая конструкцию потенциального барьера при наличии электрического поля

Анализ формулы (1.4) показывает, что вероятность туннельного эффекта очень сильно зависит от напряженности электрического поля, а напряженность поля зависит от толщины р-п - перехода (барьера). Если $E = 1ЭВ$, $M = 0.1МО$, то при напряженности поля $7*10$ В/см вероятность эффекта резко изменяется от нуля до десятых долей единиц. Толщина барьера, соответствующая этим данным, составляет 10 см. Приведенные выше данные дают возможность судить, при каких условиях становится существенным туннельных эффект в полупроводниках. Как видно из формулы (1.4), величина вероятности туннельного эффекта значительно зависит от значения напряженности электрического поля, а сильное электрическое поле в полупроводнике легче создать в области р-п перехода. В области р-п - перехода при отсутствии внешнего напряжения возникает электрическое поле, создаваемое контактной разностью потенциалов. Известно, что величина напряженности поля зависит от толщины р-п - перехода, а ее величина определяется степенью легирования р- и п- областей р-п - перехода. Оценка, проведенная по известным формулам и (1.4) показывает, что заметный туннельный эффект в полупроводниковой структуре с р-п - переходом можно получить, если концентрация примесей в р- и п- областях составляет порядка 10 см. Поэтому в отличии от всех остальных полупроводниковых диодов для изготовления ТД применяется полупроводниковый материал высокой степени легирования. Высокая степень легирования прилегающих к р-п -переходу областях приводит к следующим последствиям: толщина р-п -перехода на два порядка меньше, чем в других полупроводниковых диодах (10 мкм).

Расщепление примесных энергетических уровней с образование примесных зон, которые примыкают к зоне проводимости в n-области и к валентной зоне в p-области. Уровни Ферми при этом оказываются расположенными в разрешенных зонах, т.е. полупроводниковые области становятся вырожденными. Это означает, что концентрация электронов и дырок в зонах уже не подчиняется простой статистике Больцмана, а подчиняется статистике Ферми-Дирака. На рис. 2 приведены энергетические зонные диаграммы для p-n - перехода при отсутствии вырождения (А) и при наличии вырождения обеих сторон p-n - перехода.

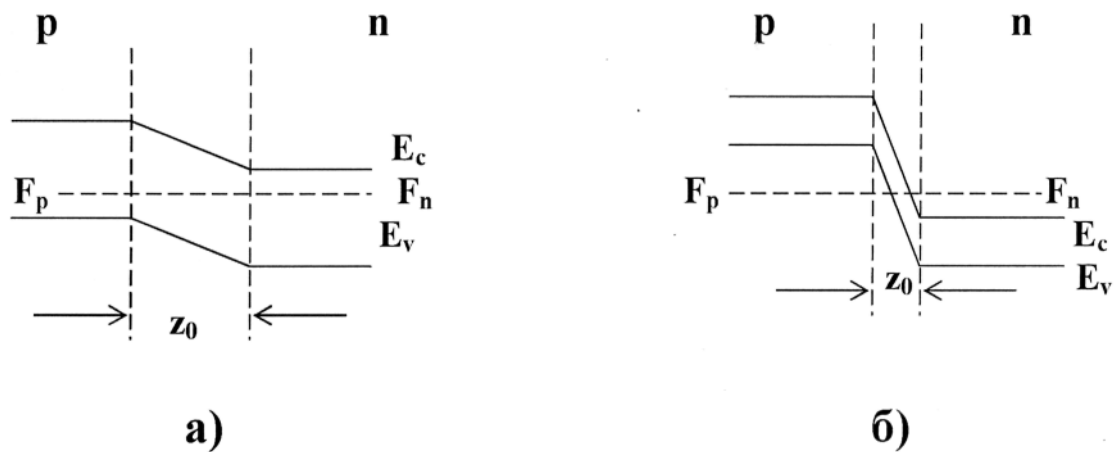


Рис. 2. Энергетическая зонная диаграмма полупроводниковой структуры с p-n переходом при отсутствии вырождения (а) и при наличии вырождения (б)

В p-n - переходе невырожденного полупроводника нижняя граница зоны проводимости в n-области смещена по отношению к нижней границе зоны проводимости в p-области. В этом случае для перехода электрона в область противоположного типа проводимости он должен обладать энергией, равной или большей высоты потенциального барьера. В обычном p-n - переходе ток обусловлен лишь диффузией неосновных носителей, преодолевших потенциальный барьер - диффузионный ток. Если p-n - переход образован

вырожденными полупроводниками, тогда искривление зон происходит настолько сильно, что дно зоны проводимости n -типа становится ниже потолка валентной зоны области с проводимостью p -типа. В этом случае создаются условия, при которых вероятность туннельного прохождения некоторых электронов в обеих зонах будет одинаковой. При отсутствии внешнего поля переход электронов справа налево и в обратном направлении одинаков и общий ток равен нулю (рис. 3а). Различают прямые и не прямые переходы электронов, участвующих в туннелировании. Прямой туннельный переход осуществляется без каких-либо изменений энергии электрона в процессе прохождения из одной разрешенной зоны в другую, не прямой переход осуществляется через дополнительный энергетический уровень. При небольшом прямом напряжении на туннельном диоде происходит уменьшение высоты потенциального барьера p - n - перехода или смещение энергетической диаграммы n -области относительно энергетической диаграммы p -области. Свободные энергетические уровни p -области (занятые дырками), расположенные непосредственно над уровнем Ферми, оказываются на одной высоте по энергетической диаграмме или при одних и тех же значениях с энергетическими уровнями n -области, занятыми электронами (рис. 3б). Поэтому будет происходить преимущественное туннелирование электронов из n -области в p -область.

При прямом напряжении на диоде, когда свободные энергетические уровни валентной и примесной зон p -области окажутся на одной высоте с занятыми электронами энергетическими уровнями зоны проводимости и примесной зоны n -области, туннельный ток через диод будет максимальным (рис. 3в).

При дальнейшем увеличении прямого напряжения на диоде туннельный ток через диод будет уменьшаться. Так как из-за смещений энергетических диаграмм будет уменьшаться количество электронов, способных туннелировать из n -области в p -область (рис. 3г).

Туннельный ток через диод окажется равным нулю при некотором еще большем прямом напряжении, когда из-за относительного смещения энергетических диаграмм n - и p -областей для свободных электронов n -области не будет свободных энергетических уровней в p -области (рис. 3д). Однако при этом через диод будет проходить прямой ток, обусловленный переходом носителей заряда через понизившийся потенциальный барьер p - n - перехода, т.е. ток, связанный с инжекцией.

С дальнейшим увеличением прямого напряжения в связи с уменьшением высоты потенциального барьера прямой ток через туннельный диод будет возрастать, как и в обычных выпрямительных диодах (рис. 3е).

При обратном напряжении на туннельном диоде опять возникают условия для туннелирования электронов (рис. 3ж). Только теперь электроны туннелируют из валентной зоны p -области в зону проводимости n -области. Возникающий при этом обратный ток будет расти с увеличением обратного напряжения по абсолютному значению. Туннельный диод обладает относительно высокой проводимостью при обратном напряжении. Можно считать, что у туннельного диода при ничтожно малых обратных напряжениях происходит туннельный пробой.

Таким образом, туннельный диод обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением в некотором диапазоне прямых напряжений. Это и является самым интересным свойством туннельного диода, так как всякий прибор с отрицательным дифференциальным сопротивлением может быть использован для генерации и усиления и электромагнитных колебаний, а также в переключающих схемах.

2. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

Если p - n - переход образован вырожденными полупроводниками p - и n -областями, а толщина его настолько мала, что существенно туннельное прохождение электронов через потенциальный барьер, то ВАХ p - n - перехода

приобретает качественно новые особенности по сравнению с ВАХ обычных p-n – переходов.

Число туннельных переходов от электронной области к дырочной в интервале энергии от E до $E + dE$ определяется выражением:

$$N_c(E)f_c(E)dE \quad (5)$$

(2.1) - число занятых электронами состояний в зоне проводимости и число свободных мест дырок в валентной зоне.

$$N_v(E)[1 - f_v(E)]dE \quad (6)$$

где N_c , N_v , F_c , F_v - плотности квантовых состояний и функций заполнения состояний с энергией от E до $E+dE$ в зоне проводимости и валентной зоне соответственно. Тогда полное число туннельных переходов от электронной области к дырочной будет:

$$I_{vc} = A \int N_c N_v f_c (1 - f_v) Z_{cv}(E) dE \quad (7)$$

а в обратном направлении:

$$I_{vc} = A \int N_v N_c f_v (1 - f_c) Z_{vc}(E) dE \quad (8)$$

где A - множитель определенный площадью перехода, Z вероятность туннельных переходов.

При условии равновесия и $U=0$ уровень Ферми в обеих областях находится на одной высоте, т.е.

$$f_c = f_v \frac{1}{1 + \exp \frac{E-F}{kT}} \quad (9)$$

А также имеется равенство:

$$Z_{cv} = Z_{vc} = Z \quad (10)$$

Тогда имеет место равенство:

$$I_{cv} = I_{vc} \quad (11)$$

Если к туннельному переходу приложить внешнее напряжение, то при этом нарушается равновесие и уровни Ферми смещаются, и пользуясь понятием квазиуровня Ферми F_n и F_p можно записать функции Ферми так:

$$f_c(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-F}{kT}\right)} \quad (12)$$

уровня Ферми в соответствующих разрешенных зонах, т.е. зависит от свойств материала и степени легирования. Определяется выражением:

$$U_n = -\frac{1}{6}e(2\Delta E_p + \Delta E_n)^2 + 4\Delta E_p\Delta E_n \quad (13)$$

$$\Delta E_p = E_{vp} - F_p, \quad (14)$$

$$\Delta E_n = F_n - E_{cn}, \quad (15)$$

где ΔE_p , ΔE_n - глубина залегания уровня Ферми в р-области, глубина залегания уровня Ферми в n-области. Напряжение U , при котором наблюдается минимум тока в ТД, непосредственно связано со степенями вырождения (рис. 3д).

$$eU_I = \Delta E_n + \Delta E_p. \quad (16)$$

Наименьшее значение тока I_B на прямой ветви ВАХ при напряжении смещения U называют избыточным током или током минимума (ток впадины). В этой точке знак проводимости меняется с отрицательного на положительный. Точное математическое выражение для токов составить не удастся, так как его величина зависит от ряда факторов. Ток состоит из двух частей - туннелированный ток через потенциальный барьер и диффузионный ток через потенциальный барьер.

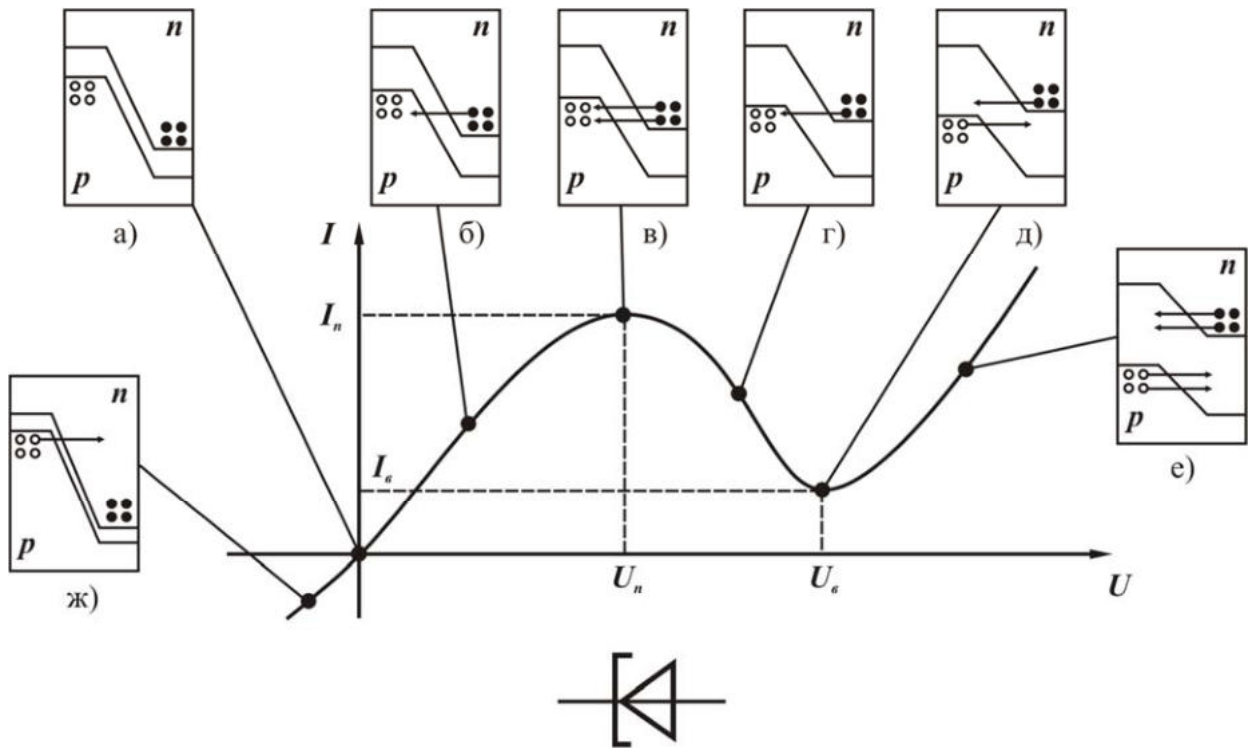


Рис. 3. ВАХ и энергетические диаграммы туннельного диода при: а) отсутствии напряжения; б) небольшом прямом напряжении; в) пиковом напряжении; г) напряжении, соответствующем отрицательному дифференциальному сопротивлению; д) напряжению впадины; е) напряжению раствора, вызывающее значительный инжекционный ток; ж) обратное напряжение

3. Основные параметры туннельного диода

Промышленность выпускает ТД из арсенида галлия и германия. ВАХ этих диодов отличаются друг от друга. Это связано с различием ширины запрещенной зоны. Туннельный диод характеризуется специфическими параметрами:

1. Пиковый ток $I_{п}$ - прямой ток в точке максимума ВАХ, при котором значение максимально. Этот ток различен для ТД разного назначения. Величина может меняться от десятых долей миллиампера до сотен миллиампер.

2. Ток впадины $I_{в}$ - прямой ток в точке минимума ВАХ, при котором значение минимально.

3. Отношение пикового тока к току впадины. Для германиевых ТД: $I_{\Pi}/I_B=3..6$; GaAs-10.

4. Напряжение пика U_n - прямое напряжение, соответствующее пиковому току. Для ТД из GaAs $U=100-150$ мВ, для германиевых $U=40-60$ мВ.

5. Напряжение впадины U_B - прямое напряжение, соответствующее току впадины. У ТД из GaAs $U=400-500$ мВ, у германиевых $U=250-350$ мВ.

6. Напряжение раствора U_p - прямое напряжение, большее напряжения впадины, при котором ток равен I_{Π} .

7. Удельная емкость ТД - отношение емкости ТД к пиковому току. C_d/I_{Π} . Величина емкости перехода при $U=U_B$ примерно на 20% больше, чем при $U=U_n$.

8. Предельная резистивная частота - расчетная частота, на которой активная составляющая полного сопротивления последовательной цепи, состоящей из р-п - перехода и сопротивления потерь, обращается в нуль

$$f_n = \frac{1}{2\pi|r|C_{бар}}$$

9.Резонансная частота ТД - расчетная частота, на которой общее реактивное сопротивление р-п - перехода и индуктивности корпуса ТД обращается в нуль.

10.Дифференциальная отрицательная проводимость определяется концентрацией примесей, типом материала и величиной положительного смещения. Формула для определения дифференциальной проводимости мало пригодна для практического применения, так как выражение для туннельного диода на участке отрицательной проводимости весьма громоздко. Поэтому для практики целесообразно пользоваться эмпирическими формулами, полученными на базе статического материала. Так, например, для определения минимального дифференциального отрицательного сопротивления германиевого туннельного диода применяется формула вида:

$$R_{min} = 0.4 \frac{U_B - U_{\Pi}}{I_{\Pi} - I_B}. \quad (17)$$

Величины отрицательной проводимости и емкости определяют быстродействие ТД. Существенное влияние на параметры ТД оказывает температура. Изменение температуры может по-разному влиять на туннельную составляющую тока и на составляющую, связанную с инжекцией.

Температурные изменения могут определяться двумя физическими факторами:

1. При повышении температуры уменьшается ширина запрещенной зоны арсенида галлия, а это приводит к уменьшению толщины потенциального барьера, при этом вероятность туннелирования растет, туннельная составляющая и, в частности, пиковый ток увеличивается.

2. С увеличением температуры изменяется распределение электронов по энергетическим уровням - количество электронов под уровнем Ферми в зоне проводимости n-области уменьшается, так как часть свободных электронов переходит на более высокие энергетические уровни, а уровень Ферми смещается вниз. Поэтому уменьшается число электронов, которые могут туннелировать из n-области в p-область. Туннельная составляющая прямого тока уменьшается. Суммарное влияние этих факторов может привести как к увеличению, так и к уменьшению пикового тока с увеличением температуры. Инжекционная составляющая тока ТД растет с увеличением температуры по двум причинам, имеющим место и в выпрямительных диодах – уменьшение высоты потенциального барьера и перераспределение носителей заряда по энергетическим уровням. Поэтому ток впадины у ТД растет с увеличением температуры.

Порядок выполнения работы

1. Включить тумблер на макете и все приборы в сеть.
2. Установить напряжение источника питания 15В.
3. Увеличивая потенциометром напряжение на туннельном диоде (от 0 до 600 мВ), снять вольт-амперную характеристику и построить график зависимости тока I от напряжения U .

4. Определить из графика основные параметры ТД.

Контрольные вопросы

1. Укажите существенные отличия туннельного диода от обычного полупроводникового диода.
2. Объясните явление туннельного эффекта.
3. Укажите достоинства туннельных диодов.
4. Постройте и объясните вольт-амперную характеристику туннельного диода.
5. Как определить величину среднего отрицательного сопротивления туннельного диода?
6. Поясните смысл понятия «отрицательное сопротивление».
7. Расскажите о применении туннельных диодов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА УСТАНОВКЕ Л2-56

Цель работы: изучить работу установки Л2-56 и исследовать характеристики полупроводниковых приборов.

Порядок подготовки установки Л2-56 для выполнения работы

1. Включить прибор Л2-56 и прогреть 30 мин. проверить работоспособность установить органы управления прибора в начальное положение согласно табл.1. Отрегулируйте яркость, фокусировку пятна, яркость индикации и освещения шкалы.

Таблица 1

Наименование	Условное обозначение	Положение
Переключатель ВЕРТИКАЛЬ	ВЕРТИКАЛЬ	I mA/дел
Переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ	ГОРИЗОНТАЛЬ	I v/дел - КОЛЛЕКТОР

Переключатель АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК	АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК	0,05 μ А/ступ
Кнопка x0,1	x0,1	Отпущена
Кнопка ИНВЕРТИРОВАНИЕ ПОЛЯРНОСТИ	ПОЛЯРН. ИНВЕРТ.	Отпущена
Переключатель ПРЕДЕЛ ТОКА	ПЕРЕДЕЛ ТОКА	20 мА
Переключатель КОЛИЧЕСТВО СТУПЕНЕК	КОЛИЧЕСТВО СТУПЕНЕК	I
Потенциометр СМЕЩЕНИЕ СТУПЕНЕК		0,00
Кнопка СМЕЩЕНИЕ ВКЛЮЧЕНО	ВЫКЛ.	Нажата
Кнопка НОРМАЛЬНЫЕ СТУПЕНИ	НОРМ. СТУПЕНИ	Нажата
Кнопка СТУПЕНИ ВКЛЮЧЕНЫ	ВКЛ.	Нажата
Кнопка ЧАСТОТА СТУПЕНЕК В СЕКУНДУ 100	100	Нажата
Кнопка БАЗА- ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК переключателя СЕЛЕКТОР ВЫВОДОВ	ГЕН.СТУП.	Нажата
Ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА	ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА	ОТКЛ.
Кнопка ФИЛЬТР	ФИЛЬТР	Отпущена

2. Установите исследуемый полупроводниковый диод в одно из контактных устройств согласно табл.2 и установите контактное устройство

на плату блока питания транзисторов.

Таблица 2

Наименование контактного устройства	Допустимое напряжение, В	Типы корпусов испытываемых транзисторов и диодов
КУ-02	2000	Диоды в корпусах КД-6
КУ-05	2000	Транзисторы в корпусах КТ-24
КУ-06	500	Диоды в корпусах КД-12 и КД-13
КУ-07	500	Универсальное для маломощных транзисторов с длинными выводами
КУ-08	500	Бескорпусные транзисторы в таре ТС-1
КУ-09	500	Триоды маломощные с короткими выводами
КУ-10	500	Полевые транзисторы
КУ-11	500	Транзисторы в корпусах КТ-23 и корпусах пластмассовых

При исследовании полупроводниковых приборов в корпусах, отличных от указанных в табл.2 соедините выводы исследуемого прибора с соответствующими гнездами платы блока испытания транзисторов с помощью коротких перемычек.

3. Общие указания.

- Перед сменой испытуемого полупроводникового прибора, перед коммутацией ручек источника питания коллектора и генератора ступенек, переведите ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА в положение ОТКЛ.

- Перед началом измерения устанавливайте ручки переключателей ВЕРТИКАЛЬ и ГОРИЗОНТАЛЬ на менее чувствительные шкалы. Ручку

АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК устанавливайте на минимальную амплитуду, в ручку () РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ устанавливайте на 0%.

- Перед началом измерения проверьте соответствие положения переключателя МАКСИМАЛЬНАЯ ПИКОВАЯ МОЩНОСТЬ допустимой мощности испытуемого полупроводникового прибора. Будьте особенно внимательны при использовании максимальной пиковой мощности 75 Вт и более. Помните, что продолжительность непрерывной работы прибора при максимальной пиковой мощности 75 Вт и более в режиме обычных ступенек ограничена 30 мин.

- Будьте внимательны при использовании тока ступенек 100 мА/ступ и 200 мА/ступ. Помните, что суммарный ток усилителя ступенек (смещение плюс ступени) не должен превышать 2 А.

При фиксированном значении 2В/ступ ток нагрузки не должен быть более 20 мА.

Продолжительность непрерывной работы при суммарном токе усилителя ступенек (в режиме обычных ступенек) 2А ограничена 30 мин.

- После включения и прогрева прибора нажмите кнопку СТУПЕНИ ОДНОКРАТНЫЕ (ОДНОКР) для приведения триггеров генератора ступенек в исходное состояние.

- Не допускайте ухода изображения за пределы экрана ЭЛТ в положении НОРМ. переключателя МНОЖИТЕЛЬ (МНОЖ). При необходимости увеличения максимального пикового напряжения сначала переведите переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ на менее чувствительную шкалу.

При необходимости увеличения максимальной пиковой мощности и амплитуды ступенек сначала переведите переключатель ВЕРТИКАЛЬ на менее чувствительную шкалу.

ВНИМАНИЕ! При использовании коллекторного напряжения свыше 16В пользуйтесь защитным кожухом. При смене транзистора обязательно выведите на нуль ручку РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ () во избежание

поражения оператора электрическим током. Следите за исправностью электрической блокировки.

При наблюдении семейства вольтамперных характеристик мощных биполярных транзисторов, во избежание их перегрева, рекомендуется использовать импульсный режим источника питания базовой цепи, для чего нажмите кнопку 300 мкс или 80 мкс. При этом источник питания коллекторной цепи переходит в режим постоянного тока и каждая характеристика изображается в виде пятна. (Может потребоваться регулировка ручки ЯРКОСТЬ).

При необходимости наблюдать семейство характеристик в режиме обычных ступенек без теплоотвода можно воспользоваться также кнопкой **ОДНОКРАТНЫЕ СТУПЕНИ**. При нажатии кнопки **ОДНОКРАТНЫЕ СТУПЕНИ** генерируется один период ступенчатого тока. При наблюдении вольтамперных характеристик биполярных транзисторов в микрорежиме (при токах коллектора менее 400мкА) рекомендуется использовать режим постоянного тока источника питания коллекторной цепи, для чего следует перевести переключатель **РЕЖИМ** в положение =.

При этом на экране каждая характеристика будет изображаться в виде пятна, соответствующего ее концу.

Для повышения точности отсчета параметров в приборе предусмотрен режим «Электронной лупы», позволяющий повысить чувствительность индикации по любой из координат в 10 раз.

Для измерения, например, I_c по вертикали в режиме «электронной лупы» переведите переключатель **МНОЖИТЕЛЬ (МНОЖ)** в положение **x 1 ВЕРТ.**, затем переключателем **КАЛИБРОВАННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ** выведите исследуемую точку характеристики на осевую горизонталь с погрешностью не более 0,5 дел и переведите переключатель **МНОЖИТЕЛЬ** и положение **ВЕРТ.** **x 10**.

Ток коллектора можно определить по формуле

$$I_{\text{ВЕРТ}} = [(\Pi - 1)10 \pm \alpha] M_{\text{ВЕРТ}}$$

где Π – показание лимба переключателя КАЛИБРОВАННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ;

α - расстояние (в делениях) от исследуемой точки до осевой горизонтали;

$M_{\text{ВЕРТ}}$ – масштаб по вертикали.

Если точка располагается ниже осевой горизонтали, то α войдет в формулу со знаком «-».

Аналогично используется режим «электронной лупы» при изменении напряжения по горизонтали, при этом

$$U_{\text{ГОР}} = (\Pi 10 \pm \alpha) M_{\text{ГОР}}$$

где $M_{\text{ГОР}}$ – масштаб по горизонтали (α берется со знаком «-», если исследуемая точка левее осевой вертикали).

КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ!

Закорачивание и обход блокировки.

Заземление прибора обязательно.

Для уменьшения помех рекомендуется, удалить прибор от источников внешних электромагнитных полей и выбрать включение вилки сети, соответствующее минимальным помехам.

- Не применяйте больших усилий для переключения кулачковых и галетных переключателей.
- Во избежание ошибок, перед проведением измерений обязательно проверьте и откорректируйте положение пятна при нажатой кнопке НУЛЬ.

- Располагайте прибор таким образом, чтобы избежать прямого попадания света от внешних источников на лицевую панель прибора.

4. Порядок выполнения работы для исследования характеристик биполярных транзисторов.

4.1. Ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА установите в положение ОТКЛ. Нажмите кнопку НУЛЬ и установите пятно в нуль масштабной сетки.

4.2. Установите переключатель ПОЛЯРНОСТЬ в положение, соответствующее типу исследуемого прибора.

4.3. Установите исследуемый полупроводниковый прибор в выбранное контактное устройство и установите контактное устройство на плату блока питания.

4.4. В зависимости от наблюдаемой характеристики установите переключатели ВЕРТИКАЛЬ, ГОРИЗОНТАЛЬ, РЕЖИМ и переключатель селектора выводов в соответствующее положение согласно табл.3.

Таблица 3

Величина, измеряемая по вертикали	Величина, измеряемая по горизонтали	Схема включения транзистора	Положение переключателей			
			ВЕРТИКАЛЬ	ГОРИЗОНТАЛЬ	СЕЛЕКТОР ВЫВОДОВ	РЕЖИМ
I_C	U_{CE}	ОЭ	Любое кроме ГСТ	Коллектор	БАЗА-ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК (ГЕН.СТУП)	НОРМ
I_C	U_{BE}	ОЭ	Любое кроме ГСТ	БАЗА	БАЗА-ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК (ГЕН.СТУП)	НОРМ
I_C	I_B	ОЭ	Любое	ГСТ	БАЗА-	НОРМ

			кроме ГСТ		ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК (ГЕН.СТУП)	
I_C	U_{CB}	ОБ	Любое кроме ГСТ	Коллек тор	БАЗА- ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК (ГЕН.СТУП)	НОРМ
I_C	U_{EB}	ОБ	Любое кроме ГСТ	БАЗА	БАЗА- ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК (ГЕН.СТУП)	НОРМ
I_E	U_{CE1}	ОЭ	Любое кроме ГСТ	Коллек тор	БАЗА-ОБРЫВ (ОБРЫВ)	УТЕЧКА
I_B	U_{CB1}	ОБ	Любое кроме ГСТ	Коллек тор	ЭМИТТЕР- ОБРЫВ (ОБРЫВ)	УТЕЧКА
I_B	U_{CE}	ОЭ	ГСТ	Коллек тор	БАЗА- ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК (ГЕН.СТУП)	НОРМ
I_B	U_{BE}	ОЭ	ГСТ	БАЗА	БАЗА- ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК (ГЕН.СТУП)	НОРМ
I_E	U_{CB}	ОБ	ГСТ	Коллек тор	БАЗА- ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК (ГЕН.СТУП)	НОРМ

4.5. Наблюдение семейства выходных характеристик для схемы с общим эмиттером (ОЭ) $I_C = f(U_{CE})$:

а) переключателями ВЕРТИКАЛЬ и ГОРИЗОНТАЛЬ установите масштаб измерения I_C по вертикали и U_{CE} по горизонтали, исходя из предлагаемых максимальных величин. Так, например, при ожидаемом

максимальном токе коллектора 8мА переключатель ВЕРТИКАЛЬ необходимо поставить в положение I мА/дел, что будет соответствовать току в 8мА на всю шкалу;

Если на коллектор будет подано максимальное напряжение 10В, то переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ необходимо поставить в положение I В/дел-коллектор, что соответствует 10В на всю шкалу;

б) переключатель МАКСИМАЛЬНАЯ ПИКОВАЯ МОЩНОСТЬ установите в положение, чтобы режим транзистора по мощности не превышал предельно допустимого;

в) ручкой РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ () установите необходимое максимальное коллекторное напряжение;

г) ключом ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА подключите испытуемый транзистор;

д) переключателями АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК и КОЛИЧЕСТВО СТУПЕНЕК постепенно увеличивайте ток базы до такого предела, чтобы характеристики не выходили за пределы шкалы экрана. При этом, например, если переключатель АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК установлен в положении 0,05 мА/ступ, то первая характеристика прочерчена при токе базы равном 0 мА, вторая – 0,05 мА, третья – 0,1 мА и т.д.

Схема соединения испытуемого транзистора с отдельными элементами схемы прибора и примерный вид получаемого на экране изображения семейства выходных характеристик показаны на рис.1.

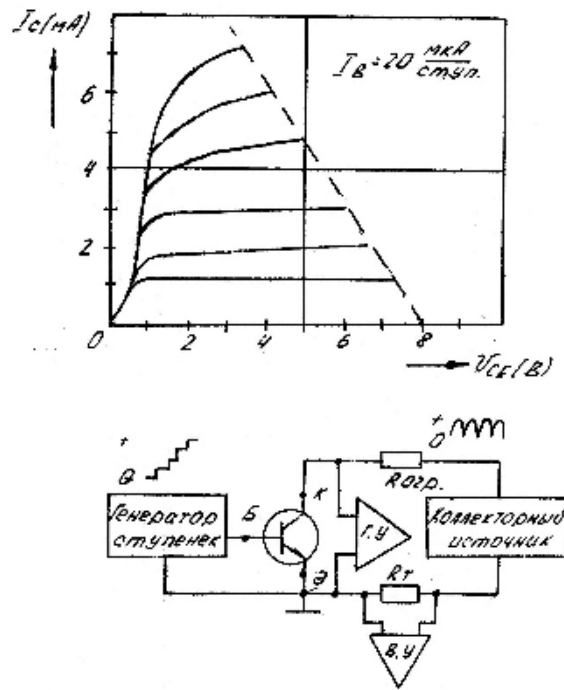


Рис. 1 Исследование выходных характеристик транзистора в схеме с ОЭ: Г.У. – горизонтальный усилитель; В.У. – вертикальный усилитель; R_T – токочувствительный резистор

4.6. Наблюдение семейства выходных характеристик для схемы с общей базой (ОБ) $I_C = f(U_{BC})$:

- а) установите ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА в положение ОТКЛ.;
- б) произведите операции, аналогичные указанным в п.п. 4.4., 4.5. (а-д);

Схема включения и вид характеристик показан на рис. 2.

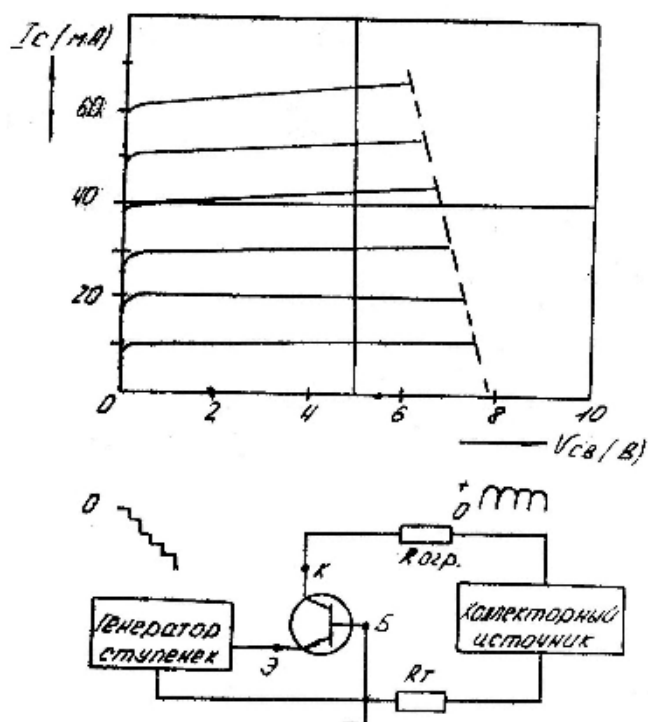


Рис. 2. Исследование выходных характеристик транзистора в схеме с ОБ

4.7. Наблюдение характеристики прямой передачи по току для схемы с ОЭ: $I_c = f(I_b)$;

а) установите ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА в положение ОТКЛ.;

б) произведите операции, аналогичные указанным в п.п.4.4., 4.5. (а-д).

Примерный вид характеристики приведен на рис. 3. Характеристика представляет собой огибающую семейства вертикальных прямых для заданного V_{ce} .

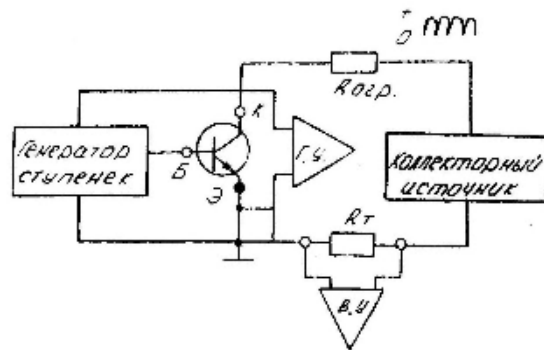
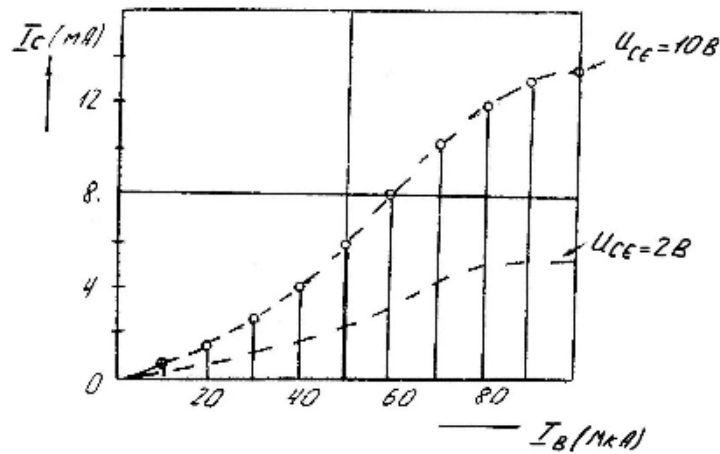


Рис. 3 Исследование характеристик прямой передачи по току транзистора в схеме с ОЭ (U_c – параметр)

Масштаб тока базы I_B , измеряемого по горизонтали, соответствует масштабу ступенек тока.

4.8. Наблюдение входных характеристик транзистора для схемы с ОЭ:

$$I_B = f(U_{BE}).$$

а) установите ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА в положение ОТКЛ., установите переключатель ВЕРТИКАЛЬ в положение ГСТ, а переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ – в положение 0,1V/дел – БАЗА;

б) произведите операции, аналогичные указанным в п.п.4.5. (б,д).

Примерный вид характеристики приведен на рис.4. Характеристика представляет собой огибающую семейства горизонтальных прямых для заданного U_{CE} .

Масштаб тока базы I_B , измеряемого по вертикали, соответствует масштабу ступенек тока.

I_X – измеренное значение тока по вертикали, нА;

I_Φ – фиксированное значение чувствительности по вертикали, нА/дел;

U_{TOP} – фактическое значение напряжения по горизонтали, В.

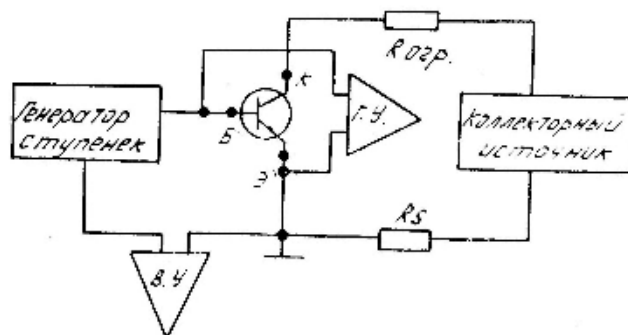
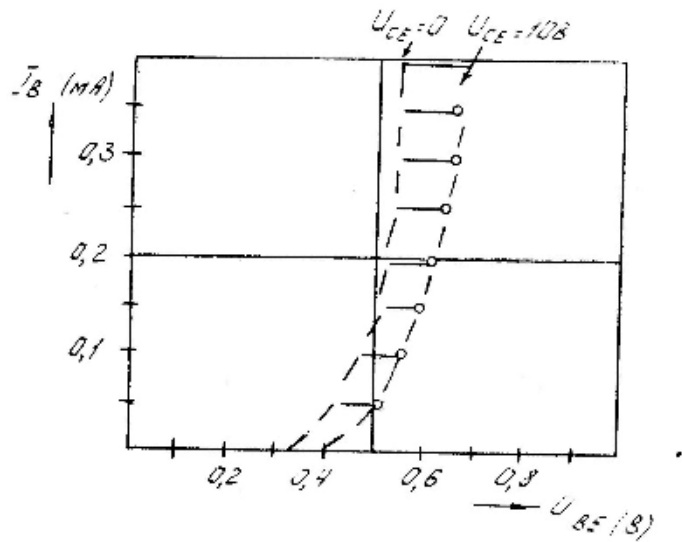


Рис. 4. Исследование входных характеристик транзистора с ОЭ

4.9. Для наблюдения остальных характеристик транзистора, указанных в табл.3 установите органы управления прибора в соответствии с этой таблицей.

Примерный вид этих характеристик и схемы включения исследуемого транзистора приведены на рис. 5-8.

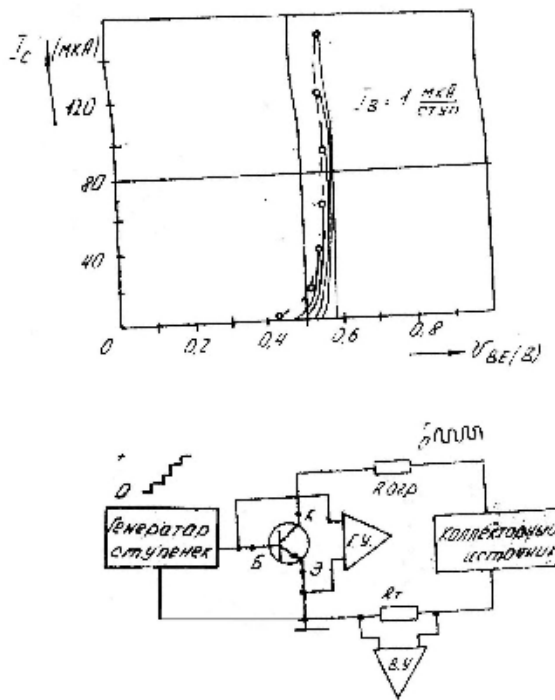


Рис. 5 Исследование переходных характеристик $U_{be}=f(I_c)$ транзистора в схеме с ОЭ (I_B – параметр)

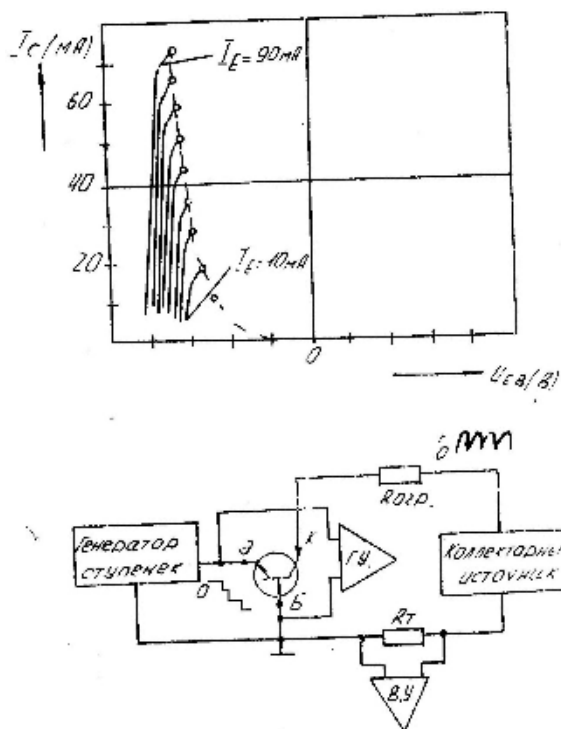


Рис. 6. Исследование переходных характеристик $U_{CE} = f(I_C)$ транзистора в схеме с ОБ (I_E – параметр)

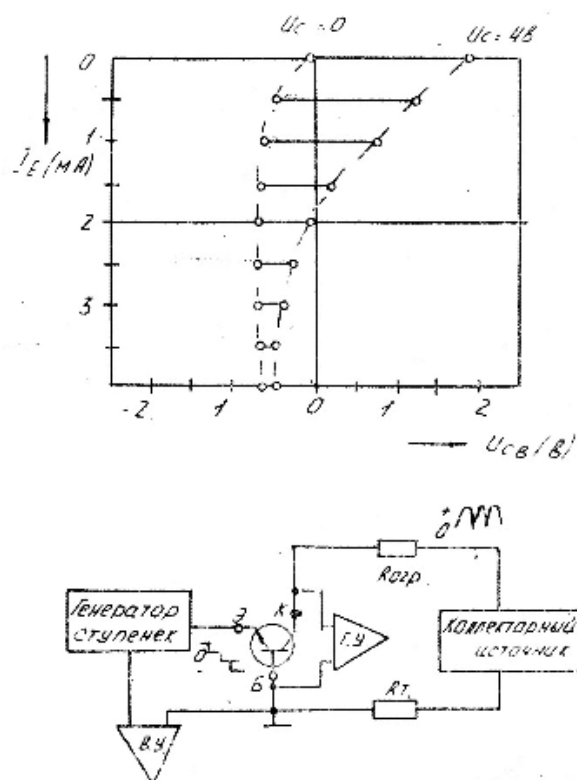


Рис. 7 Исследование характеристик $U_{CE} = f(I_E)$ транзистора в схеме с ОБ (I_C – параметр)

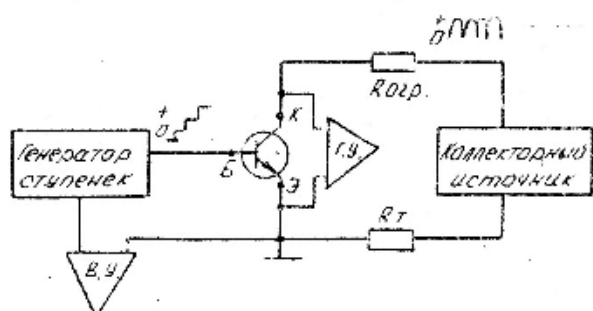
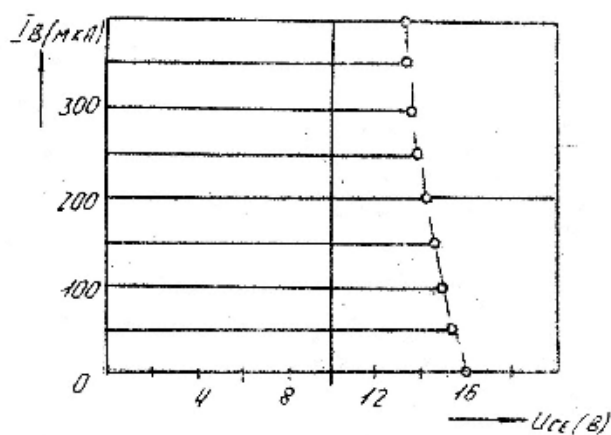


Рис. 8 Исследование характеристик $U_{CE} = f(I_B)$ транзистора в схеме с ОЭ

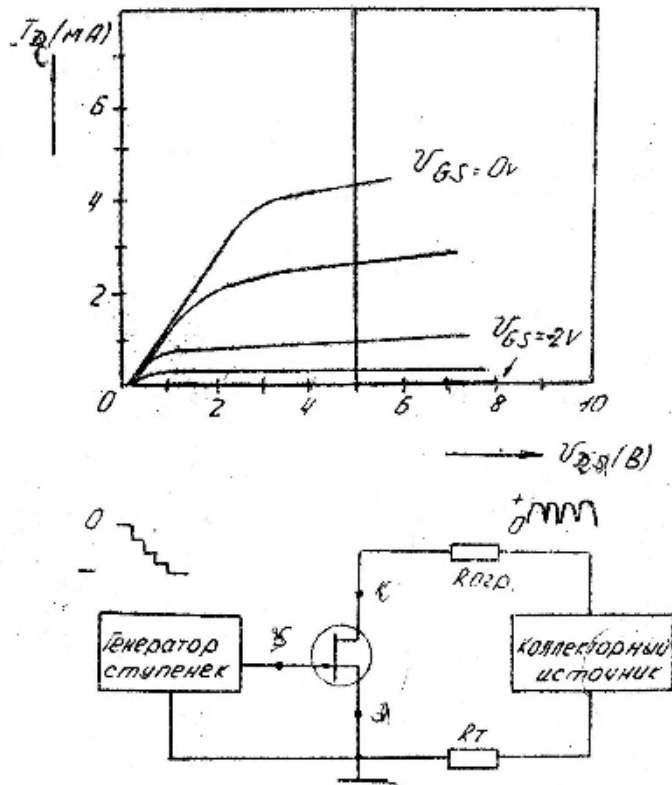
5. Порядок выполнения работы для исследования характеристик полевых транзисторов.

5.1. Установите переключатель **ПОЛЯРНОСТЬ** в положение, соответствующее типу исследуемого прибора (NPN – для приборов с n-каналом, PNP – для приборов с p-каналом).

5.2. Для наблюдения выходных характеристик $I_D = f(U_{DS})$. Прделайте операции, аналогичные п.п.4.5. (а-д), причем переключатель **АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК** устанавливайте в положение **V/ступ**, а переключатель **ГОРИЗОНТАЛЬ** должен находиться в секторе **КОЛЛЕКТОР**.

При необходимости измените полярность ступенек напряжения нажатием кнопки **ИНВЕРТИРОВАНИЕ ПОЛЯРНОСТИ (ПОЛЯРН ИНВЕРТ.)**.

Схема включения и примерный вид характеристик для различной



полярности ступенек показаны на рис. 9,10.

Рис. 9 Исследование выходных характеристик полевого транзистора

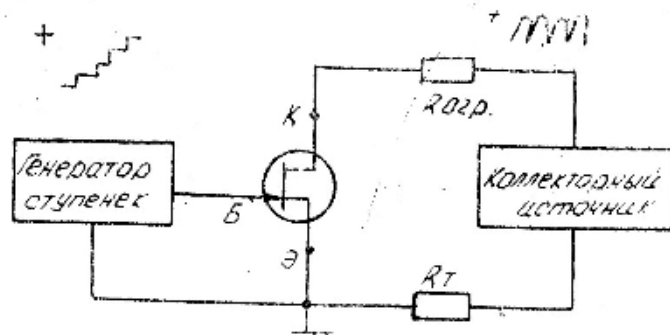
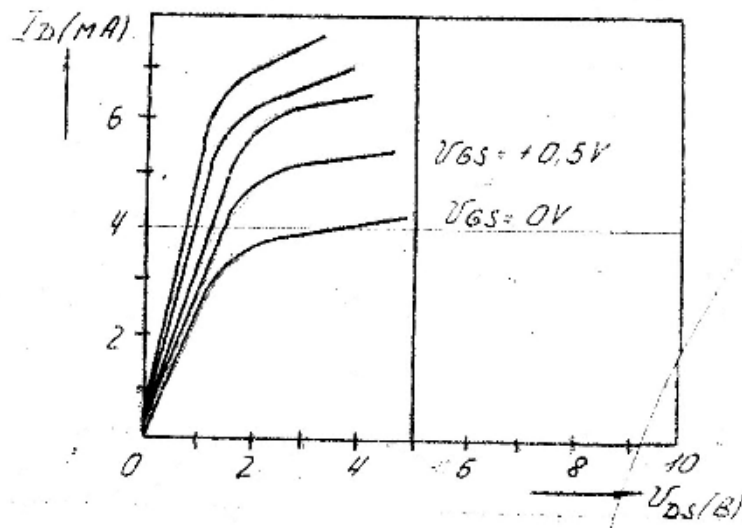


Рис. 10 Исследование выходных характеристик полевого транзистора

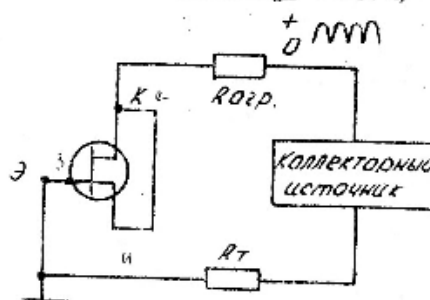
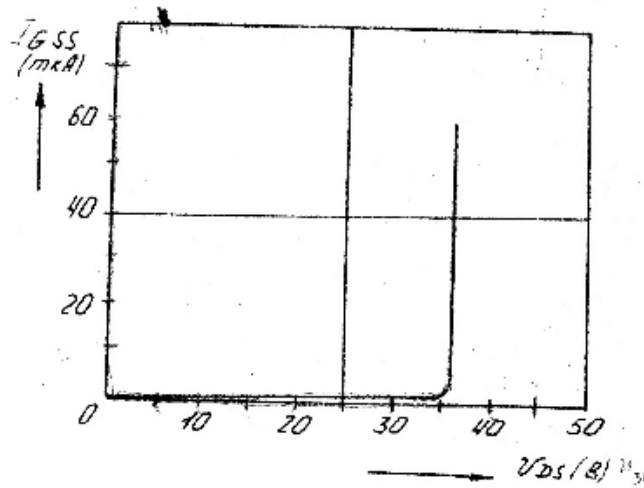


Рис. 11. Исследование напряжение пробоя и тока утечки полевого транзистора

5.3. Для определения напряжения пробоя и тока утечки $I_{GSS} = f(U_{DS})$ включите испытуемый прибор по схеме, изображенной на рис.11.

Для точного определения тока утечки переключатель РЕЖИМ переведите в положение УТЕЧКА, при этом на экране ЭЛТ высвечивается точка, соответствующая концу характеристики.

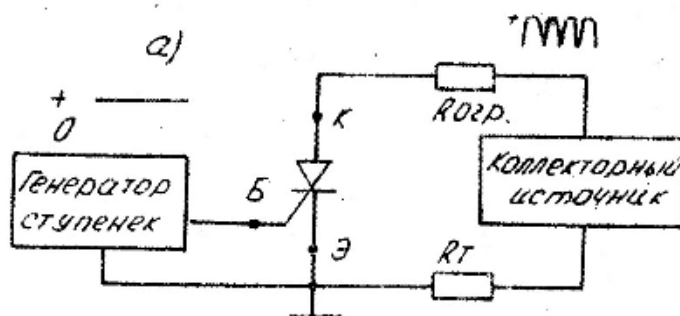
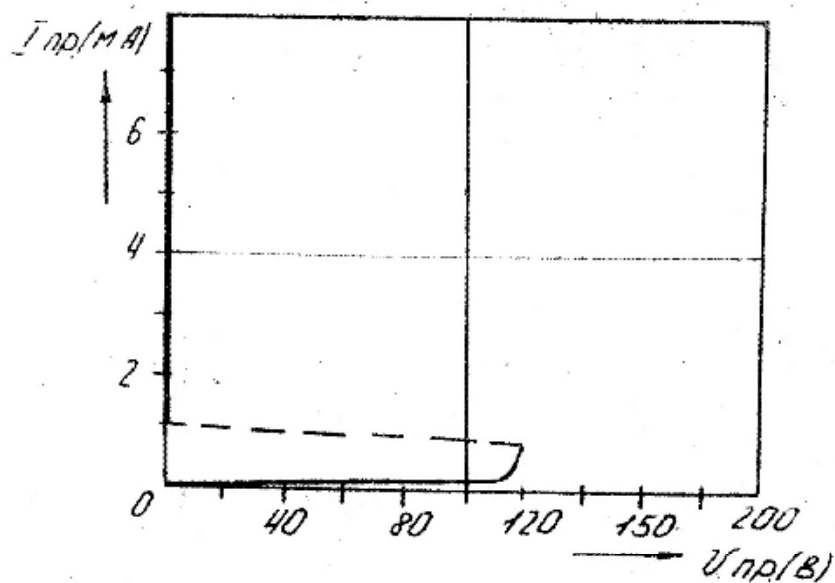


Рис. 12. Исследование тиристора

6. Порядок выполнения работы для исследования характеристик диодов и стабилитронов.

6.1 Установите ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА в положение ОТКЛ., установите исследуемый прибор в выбранное контактное устройство и установите на плату блока испытания транзисторов и диодов. Испытуемый прибор включается между коллекторным и заземленным эмиттерным зажимом по схеме, изображенной на рис. 12.

6.2. Для наблюдения прямой или обратной ветви характеристик диода или стабилитрона проделайте операции, аналогичные п.п.4.5. (а-г), при этом переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ должен находиться на секторе КОЛЛЕКТОР.

Переключателем ПОЛЯРНОСТЬ поменяйте полярность подаваемого питания и просмотрите прямую и обратную ветви характеристики.

6.3. Для наблюдения одновременно обеих ветвей характеристики установите переключатель ПОЛЯРНОСТЬ в положение \approx .

6.4. Аналогично производится наблюдение характеристик туннельных диодов.

7. Порядок выполнения работы для исследования характеристик тиристоров и других PNPN приборов.

7.1. Для измерения характеристик переключения тиристора проделайте операции, аналогичные указанным в п.п.6.1-6.2. Тиристор включите по схеме, изображенной на рис. 13.

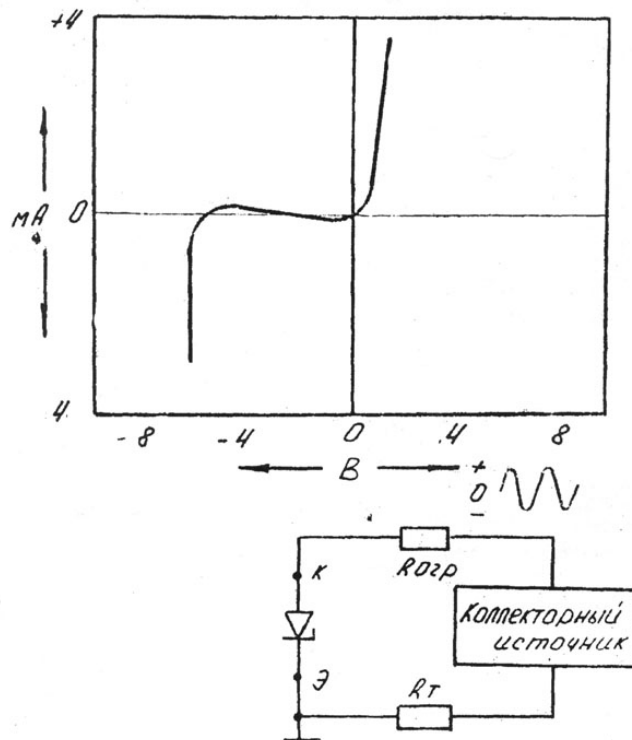
Ручная РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ () увеличивайте напряжение на аноде до момента переключения тиристора в открытое состояние.

7.2. Для определения постоянного отпирающего тока или напряжения подключите управляющий электрод к базовому зажиму или к гнезду ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЕК на блоке испытаний транзисторов и диодов.

Нажмите кнопки ПРЯМОЕ СМЕЩЕНИЕ (ПРЯМОЕ) и СТУПЕНИ ОДНОКРАТНЫЕ (ОДНОКР.).

Ручку АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК установите в положение $\mu\text{A}/\text{ступ}$ или $\text{mA}/\text{ступ}$ соответствующее ожидаемому отпирающему току и вводите потенциометр СМЕЩЕНИЕ СТУПЕНЕК () до момента отпирания тиристора.

Величина отпирающего тока определяется как произведение масштаба ступенек тока и показание цифровой ручки потенциометра СМЕЩЕНИЕ



СТУПЕНЕК ().

Рис 13. Исследование стабилитрона

Аналогично определяется напряжение отпирания, только переключатель АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК устанавливается в положение $\text{V}/\text{ступ}$.

8. Порядок выполнения работы для исследования характеристик однопереходных транзисторов.

8.1. Установите исследуемый однопереходный транзистор в выбранное контактное устройство, подключите его по схеме, приведенной на .

8.2. Нажмите кнопки ПРЯМОЕ СМЕЩЕНИЕ (ПРЯМОЕ) и ОДНОКРАТНЫЕ СТУПЕНИ (ОДНОКР.). Установите переключатель АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК в положение 1 V/ступ или 2 V/ступ. Введите потенциометр СМЕЩЕНИЕ СТУПЕНЕК () до получения заданного значения $U_{B2}U_{B1}$. Прделайте операции аналогичные указанным в п.п.4.5. (а-г), получите на экране изображение зависимости $I_B=f(U_{EB1})$ при данном фиксированном U_{B2B1} .

Контрольные вопросы

1. Что называется биполярным транзистором?
2. Принцип работы БТ.
3. Нарисуйте схему включения БТ с указанием полярности и направления токов.
4. Как объяснить вид входных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ и ОЭ?
5. Что называется полевым транзистором?
6. Объясните конструктивные особенности и принцип действия полевого транзистора с р-n-переходом в качестве затвора и с изолированным (индуцированным и встроенным каналами) затвором.
7. Начертите схему включения полевого транзистора с указанием полярности источников напряжения в цепи затвора и стока.
8. Чем объяснить высокое входное сопротивление полевого транзистора по сравнению с биполярными транзисторами.
9. Какие носители заряда (основные или неосновные) участвуют в создании тока.
10. Объясните ход статических характеристик передачи различных полевых транзисторов.
11. Перечислите основные параметры полевого транзистора и способы их определения по характеристикам.
12. Что такое тиристор? Какие бывают тиристоры?

13. Структура и принцип действия диодного тиристора.
14. ВАХ и энергетические диаграммы диодного тиристора.
15. В чем преимущество триодного тиристора перед диодным?
16. Способы управления тиристорами.

Вопросы для тестирования

I:

S: Вследствие чего происходит в р-п переходе диффузия дырок в п-область, а электронов в р-область при равновесии?

- : экстракции
- +: градиента концентрации
- : дрейфа
- : инъекций

I:

S: Что является ограничивающим фактором диффузии в р-п переходе?

- : внешнее электрическое поле ОПЗ
- : внутреннее и внешнее электрическое поле ОПЗ
- : ограничивающего фактора диффузии в р-п переходе нет
- +: электрическое поле ОПЗ

I:

S: Как изменяется ОПЗ при прямом смещении?

- +: уменьшается
- : увеличивается
- : не изменяется
- : в начале уменьшается, затем увеличивается

I:

S: Почему уменьшается ОПЗ при прямом смещении?

- : происходит экстракция
- : происходит диффузия
- : результирующая полей увеличивается, а также происходит рекомбинация
- +: результирующая полей уменьшается, а также происходит рекомбинация

I:

S: Как изменяется ОПЗ при обратном смещении?

- : уменьшается
- +: увеличивается
- : не изменяется
- : в начале уменьшается, затем увеличивается

I:

S: Почему увеличивается ОПЗ при обратном смещении?

- : происходит диффузия
- : происходит инъекция
- : результирующая полей уменьшается, а также происходит оттягивание ННЗ

+ : результирующая полей увеличивается, а также происходит оттягивание НЗ

I:

S: Что происходит при прямом смещении в р-п переходе?

- : экстракция

+ : инжекция

- : экстракция и инжекция

- : дрейф НЗ

I:

S: Что происходит при обратном смещении в р-п переходе?

- : - инжекция

+ : экстракция

- : экстракция и инжекция

- : дрейф НЗ

I:

S: Что происходит в р-п переходе при равновесии?

- : экстракция

+ : диффузия

- : инжекция

- : дрейф НЗ

I:

S: Диодная теория - это теория тонкого р-п перехода, когда

+ : Ширина ОПЗ много меньше диффузионной длины $d \ll L$

- : Ширина ОПЗ много больше диффузионной длины $d \gg L$

- : Ширина ОПЗ равно диффузионной длине $d = L$

- : Ширина ОПЗ меньше или равно диффузионной длине $d \leq L$

I:

S: Чем пренебрегают в диодной теории?

- : экстракцией

- : дрейфом

+ : рекомбинацией

- : диффузией

I:

S: Как влияет температура на прямую ветвь ВАХ р-п перехода?

- : прямой ток убывает

+ : прямой ток возрастает

- : прямой ток равен нулю

- : прямой ток не изменяется

I:

S: Почему прямой ток на ВАХ р-п перехода возрастает с повышением T_0 ?

- : потенциальный барьер увеличивается при постоянном напряжении

+ : потенциальный барьер уменьшается при постоянном напряжении

- : потенциальный барьер не изменяется при постоянном напряжении

- : прямой ток не изменяется

I:

S: Как влияет увеличение ширины запрещенной зоны на прямую ветвь ВАХ р-п перехода при постоянном напряжении?

- : прямой ток возрастает
- +: прямой ток уменьшается
- : прямой ток равен нулю
- : прямой ток не изменяется

I:

S: Как влияет увеличение концентрации примеси на прямую ветвь ВАХ р-п перехода при постоянном напряжении?

- : прямой ток возрастает
- +: прямой ток уменьшается
- : прямой ток равен нулю
- : прямой ток не изменяется

I:

S: Почему прямой ток на ВАХ р-п перехода уменьшается с увеличением концентрации примеси?

- : потенциальный барьер уменьшается при постоянном напряжении
- +: потенциальный барьер увеличивается при постоянном напряжении
- : потенциальный барьер не изменяется при постоянном напряжении

I:

S: Как влияет увеличение температуры на обратную ветвь ВАХ р-п перехода?

- : обратный ток убывает
- +: обратный ток возрастает
- : обратный ток не изменяется
- : обратный ток равен нулю

I:

S: Как влияет увеличение ширины запрещенной зоны на обратную ветвь ВАХ р-п перехода?

- +: обратный ток уменьшается
- : обратный ток возрастает
- : обратный ток не изменяется
- : обратный ток равен нулю

I:

S: Пробоем р-п перехода называют

- : Резкое возрастание тока, при достижении прямым напряжением критического значения
- : Резкое убывание тока, при достижении обратным напряжением критического значения
- +: Резкое возрастание тока, при достижении обратным напряжением критического значения
- : Резкое убывание тока, при достижении прямым напряжением критического значения

I:

S: В каких p-n переходах может происходить туннельный пробой?

-: П/П, изготовленных с малой концентрацией примеси и с малой толщиной потенциального барьера

-: П/П, изготовленных с большой концентрацией примеси и с большой толщиной потенциального барьера

+: П/П, изготовленных с большой концентрацией примеси и с малой толщиной потенциального барьера

-: П/П, изготовленных с малой концентрацией примеси и с большой толщиной потенциального барьера

I:

S: Минимальная энергия, необходимая для удаления электрона с уровня Ферми E_{Fn} в вакууме это:

-: работа выхода электрона из металла

+: работа выхода электрона из полупроводника

-: энергия электронного сродства

-: истинная работа выхода

I:

S: Минимальная энергия, необходимая для удаления электрона со дна зоны проводимости:

-: работа выхода электрона из металла

-: работа выхода электрона из полупроводника

+: энергия электронного сродства

-: истинная работа выхода

I:

S: Диоды Шотки работают:

-: на неосновных носителях

+: на основных носителях

-: на неосновных и основных носителях

I:

S: Диоды Шотки обладают емкостью:

+: Барьерной

-: Диффузионной

-: Барьерной и диффузионной

-: Не обладают

I:

S: Требования, предъявляемые к омическому контакту:

+: Линейность ВАХ, малая величина сопротивления, не должен быть инжектирующим

-: Линейность ВАХ, большая величина сопротивления, должен быть инжектирующим

-: нелинейность ВАХ, малая величина сопротивления, должен быть инжектирующим

-: нелинейность ВАХ, большая величина сопротивления, не должен быть инжектирующим

I:

S: Биполярным транзистором называется:

+: полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ННЗ

-: полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими невыпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ННЗ

-: полупроводниковый прибор с двумя невзаимодействующими выпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ННЗ

-: полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ОНЗ

I:

S: Сколько режимов работы имеет биполярный транзистор:

-: 1

-: 2

-: 3

+: 4

I:

S: Если эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный в обратном, то какой это режим работы БТ:

-: Инверсный

-: Отсечки

-: Насыщения

+: Нормальный

I:

S: Если эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный в прямом, то какой это режим работы БТ:

-: Отсечки

-: Насыщения

-: Нормальный

+: Инверсный

I:

S: Если эмиттерный переход и коллекторный переход смещены в обратном направлении, то какой режим работы БТ:

+: Отсечки

-: Насыщения

-: Нормальный

-: Инверсный

I:

S: Если эмиттерный переход и коллекторный переход смещены в прямом направлении, то какой режим работы БТ:

-: Отсечки

+: Насыщения

-: Нормальный

-: инверсный

I:

S: Биполярный транзистор называется дрейфовым:

+: если при отсутствии тока в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору

-: если при отсутствии тока в базе не существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору

-: если при отсутствии тока в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к базе

-: если при токе в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору

I:

S: Сколько схем включения БТ существует:

-: 1

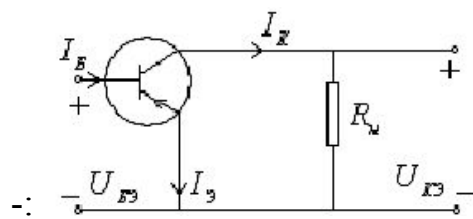
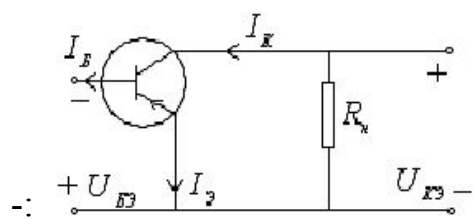
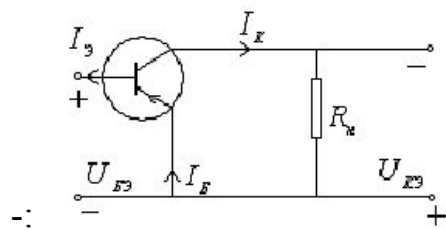
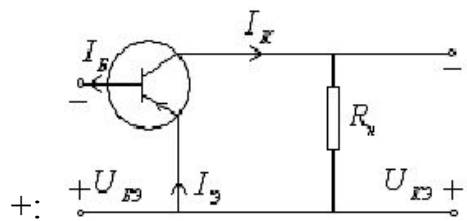
-: 2

+: 3

-: 4

I:

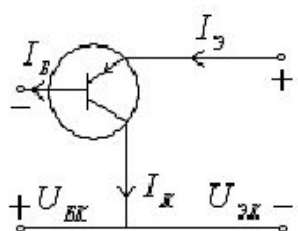
S: Схема включения БТ с общим эмиттером:

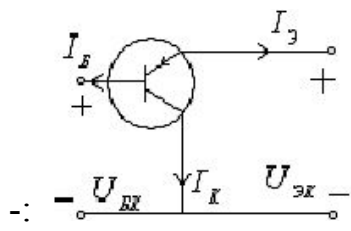
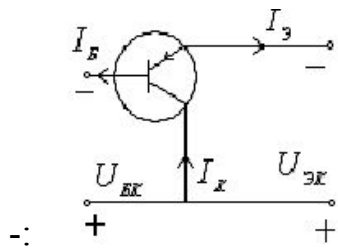
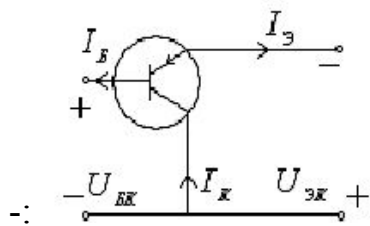


I:

S: Схема включения БТ с общим коллектором:

+:





I:

S: БТ называется бездрейфовым:

- + : если при отсутствии тока в базе отсутствует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору
- : если при отсутствии тока в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору
- : если при отсутствии тока в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к базе

I:

S: Режим отсечки БТ:

- + : оба p-n-перехода смещены в обратном направлении
- : оба p-n-перехода смещены в прямом направлении
- : один переход смещен в прямом направлении

I:

S: Если эмиттерный переход и коллекторный переход смещены в прямом направлении, то такой режим работы БТ называется:

- : Отсечки
- + : Насыщения

-: Нормальный

-: Инверсный

I:

S: Полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ННЗ называется...

+: биполярным транзистором

-: резистором

-: конденсатором

I:

S: Сколько схем включения БТ существует?

+: три

-: две

-: одна

I:

S: Если эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный в прямом, то такой режим работы БТ называется...

+: инверсный

-: прямым

-: обратным

I:

S: Что значит $U_{КБнас}$:

-: падение напряжения между выводами коллектора и эмиттера в режиме насыщения

+: падение напряжения между выводами коллектора и базы в режиме насыщения

-: падение напряжения между выводами эмиттера и базы в режиме насыщения

-: увеличение напряжения между выводами эмиттера и базы в режиме насыщения

I:

S: Тиристор - это:

+: полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, тремя и более ЭДП, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот

-: полупроводниковый прибор с двумя неустойчивыми состояниями, тремя и более ЭДП, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот

-: полупроводниковый прибор с устойчивыми состояниями, двумя и более ЭДП, который может переключаться из закрытого состояния в открытое

-: полупроводниковый прибор с неустойчивыми состояниями двумя и более выводами, который может переключаться из закрытого состояния в открытое

I:

S: Триодный тиристор можно перевести в открытое состояние:

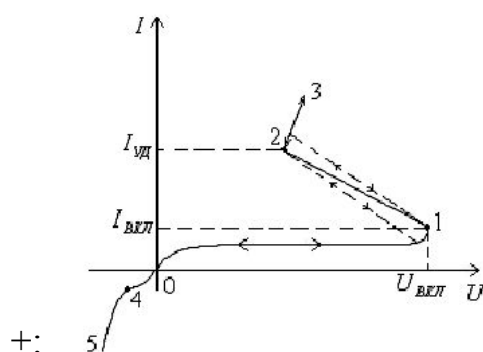
+: подав на одну из базовых областей импульса соответствующей полярности

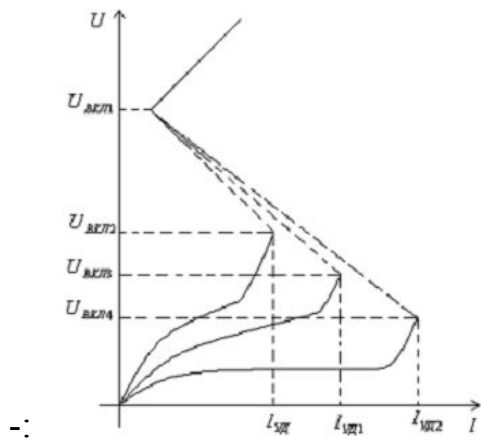
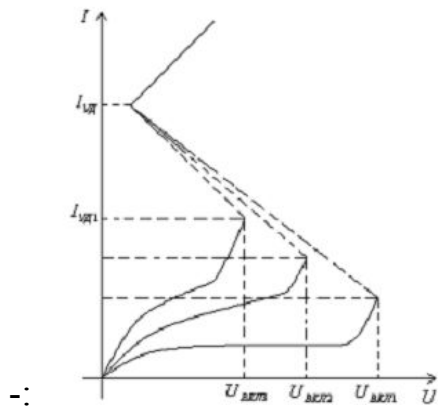
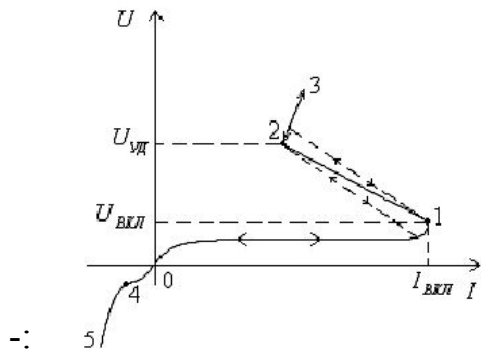
-: подав на одну из эмиттерных областей импульса соответствующей полярности

-: подав на коллекторный переход импульса соответствующей полярности

I:

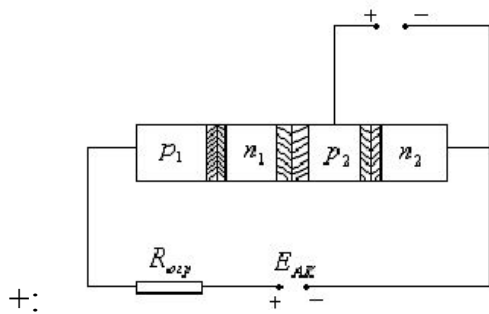
S: ВАХ диодного тиристора:

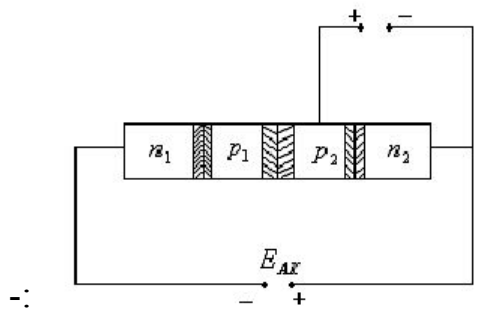
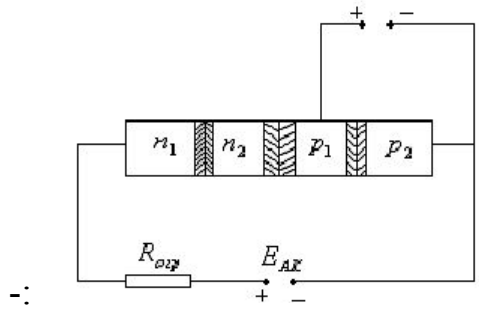
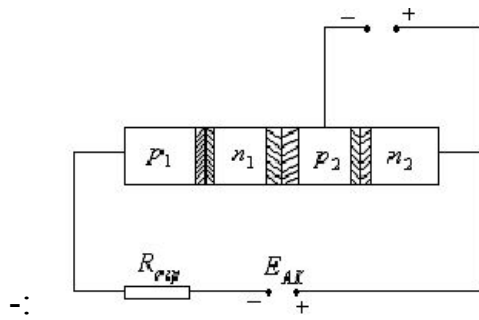




I:

S: Структура триодного тиристора:





I:

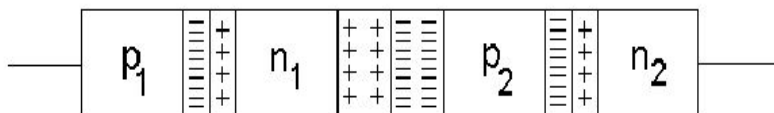
S: Полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, тремя и более ЭДП, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот называется

+ : тиристором

- : транзистором

- : полупроводниковым диодом

I:



S: На рисунке показана:

+ : структура диодного тиристора в закрытом состоянии

-: структура диодного тиристора в открытом состоянии

-: структура полевого транзистора

-: структура биполярного транзистора

I:

S: Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены...

-: потоком неосновных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем эмиттера

-: потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем коллектора

+: потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем

I:

S: Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом – это полевой транзистор, управление потоком...

-: неосновных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении

-: основных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в прямом направлении

+: основных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении

I:

S: Электрический вывод от боковой поверхности полевого транзистора называют...

-: исток (И)

-: сток (С)

+: затвор (З)

I:

S: Электрические выводы от торцевых поверхностей полупроводника называют...

-: исток (И) и затвор (З)

-: сток (С) и затвор (З)

+: исток (И) и сток (С)

I:

S: При подаче напряжения на затвор между истоком и стоком появляется пространство, через которое протекает ток, это пространство называется...

-: запрещенная зона

-: зонная структура

+: токопроводящий канал

I:

S: От ширины р-п-перехода зависит...

+: его сопротивление

-: его теплопроводность

-: его обратное напряжение

I:

S: Изменяя величину напряжения источника $U_{зи}$, меняем...

- : прямое напряжение на р-п-переходе, а значит и его ширину

- : прямое напряжение на р-п-переходе, а значит и $U_{ис}$

+: обратное напряжение на р-п-переходе, а значит и его ширину

I:

S: При увеличении напряжения $U_{зи}$ ширина р-п-перехода...

+: возрастает, а поперечное сечение канала между истоком и стоком уменьшается

-: уменьшается, а поперечное сечение канала между истоком и стоком возрастает

-: возрастает, а продольное сечение канала между истоком и стоком уменьшается

I:

S: Напряжение отсечки это...

+: такая величина напряжения на затворе, при котором р-п переход полностью перекроет канал, и ток в цепи нагрузки прекратится

-: такая величина напряжения на затворе, при котором р-n переход полностью откроет канал, и ток в цепи нагрузки возобновится

-: такая величина напряжения на стоке, при котором р-n переход полностью перекроет канал, а ток в цепи нагрузки возобновится

I:

S: Падение напряжения на сопротивлении нагрузки при...

-: протекании тока I_c является выходным сигналом, мощность которого значительно меньше мощности, затраченной во входной цепи

+: протекании тока I_c является выходным сигналом, мощность которого значительно больше мощности, затраченной во входной цепи

-: протекании тока I_c является выходным сигналом, мощность которого значительно больше мощности, затраченной в выходной цепи

I:

S: Принципиальным отличием полевого транзистора от биполярного является то, что...

-: источник входного сигнала подключен к р-n-переходу в прямом, запирающем направлении, и следовательно входное сопротивление здесь очень большое, а потребляемый от источника выходного сигнала ток очень маленький

-: источник входного сигнала подключен к р-n-переходу в обратном, запирающем направлении, и следовательно входное сопротивление здесь очень малое, а потребляемый от источника выходного сигнала ток очень маленький

+: источник входного сигнала подключен к р-n-переходу в обратном, запирающем направлении, и следовательно входное сопротивление здесь очень большое, а потребляемый от источника входного сигнала ток очень маленький

I:

S: В биполярном транзисторе управление осуществляется...

+: входным током, а в полевом транзисторе – входным напряжением

-: входным напряжением, а в полевом транзисторе – входным током

-: входным током, а в полевом транзисторе – выходным напряжением

I:

S: Поскольку потенциал от истока к стоку возрастает, то соответственно...

-: возрастает и обратное напряжение на рп-переходе, а его ширина уменьшается

-: возрастает и прямое напряжение на рп-переходе, а следовательно, и его ширина

+: возрастает и обратное напряжение на рп-переходе, а следовательно, и его ширина

I:

S: При подаче обратного напряжения на затворы полевого транзистора:

+: ширина проводящего канала уменьшается

-: ширина проводящего канала увеличивается

-: ширина проводящего канала не изменяется

-: ширина проводящего канала сначала увеличивается, затем не изменяется

I:

S: При уменьшении ширины проводящего канала полевого транзистора:

+: сопротивление канала возрастает, и ток стока уменьшается

-: сопротивление канала уменьшается, и ток стока уменьшается

-: сопротивление канала возрастает, и ток стока не изменяется

-: сопротивление канала возрастает, и ток стока возрастает

I:

S: К мало сигнальным параметрам полевого транзистора относятся только:

+: сопротивление канала

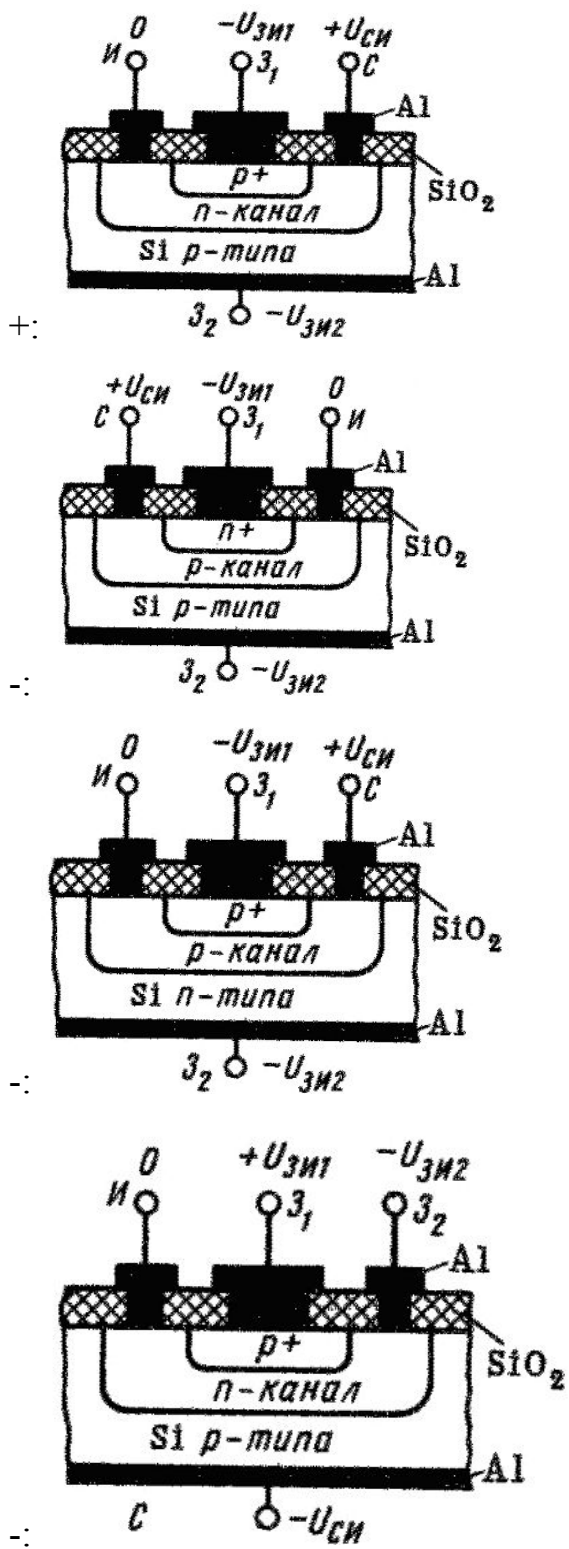
-: крутизна передаточной характеристики

-: коэффициент усиления полевого транзистора

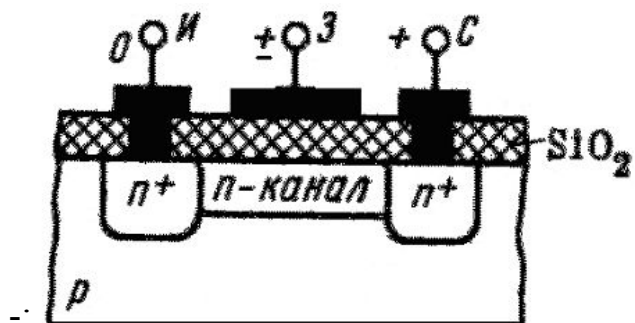
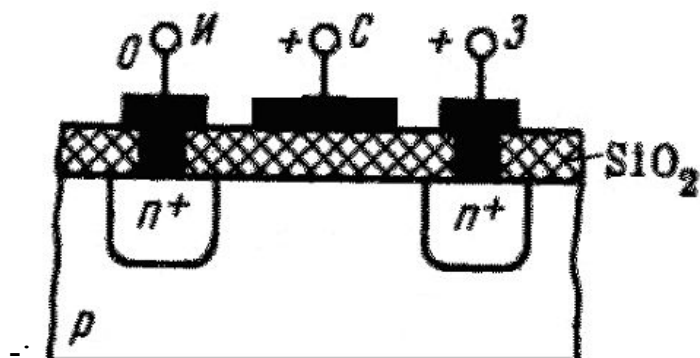
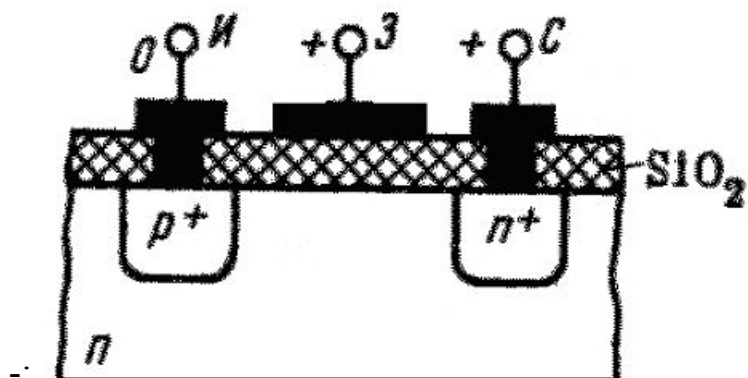
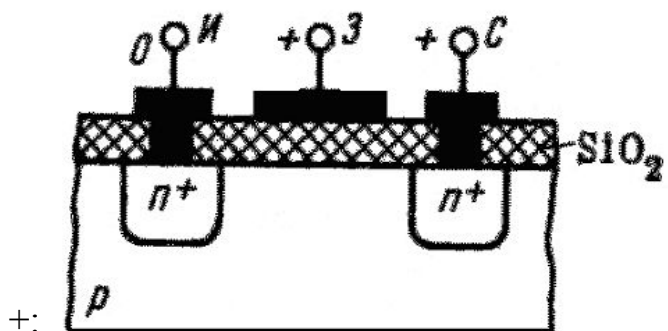
-: все перечисленные параметры полевого транзистора

I:

S: Структура полевого транзистора с двумя управляющими р-п-переходами

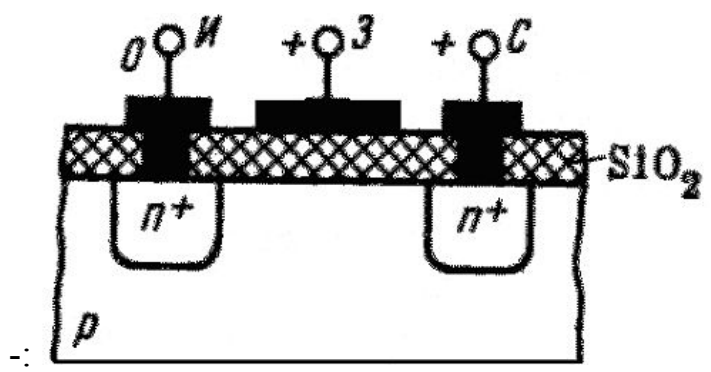
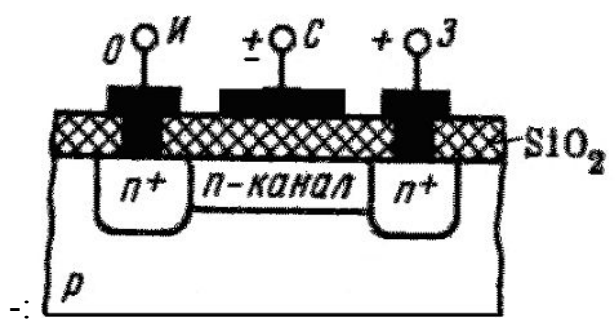
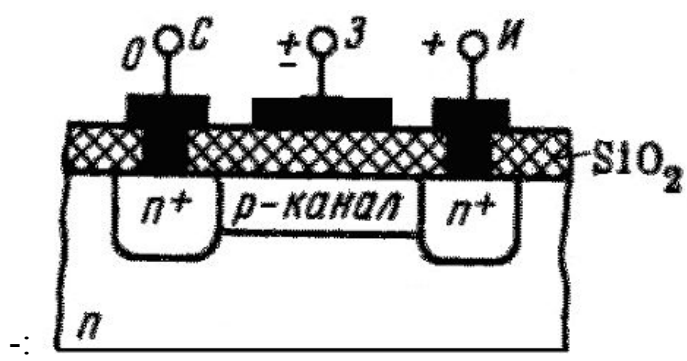
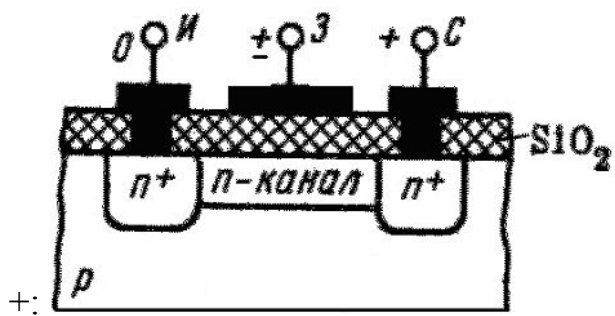


S: Структура МДП - транзистора с индуцированным каналом:



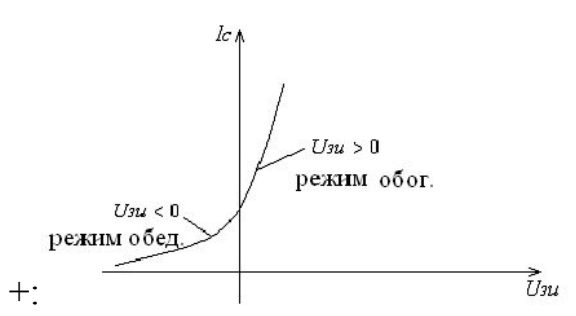
I:

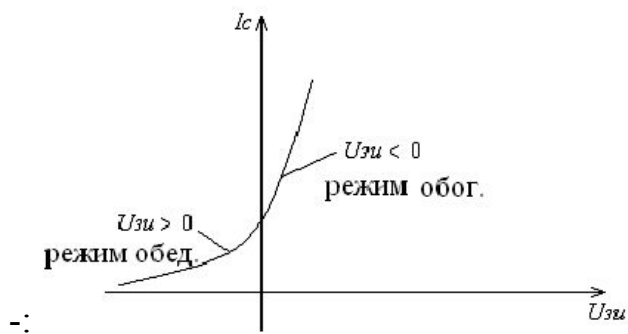
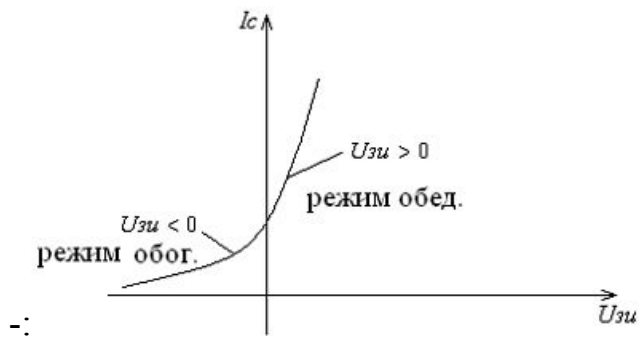
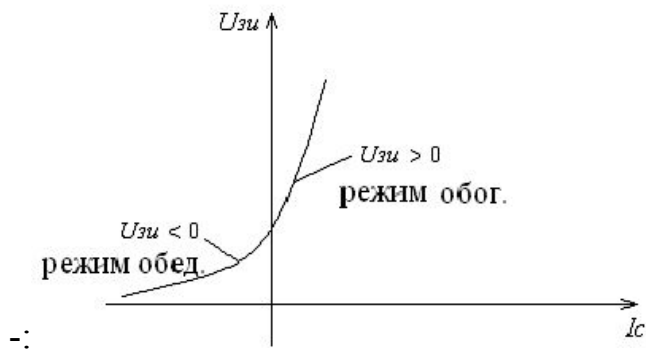
S: Структура МДП - транзистора со встроенным каналом:



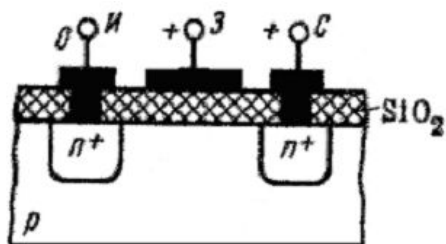
I:

S: Характеристика передачи МДП- транзистора со встроенным каналом:





I:



S: На рисунке изображена:

+: структура МДП- транзистора с индуцированным каналом

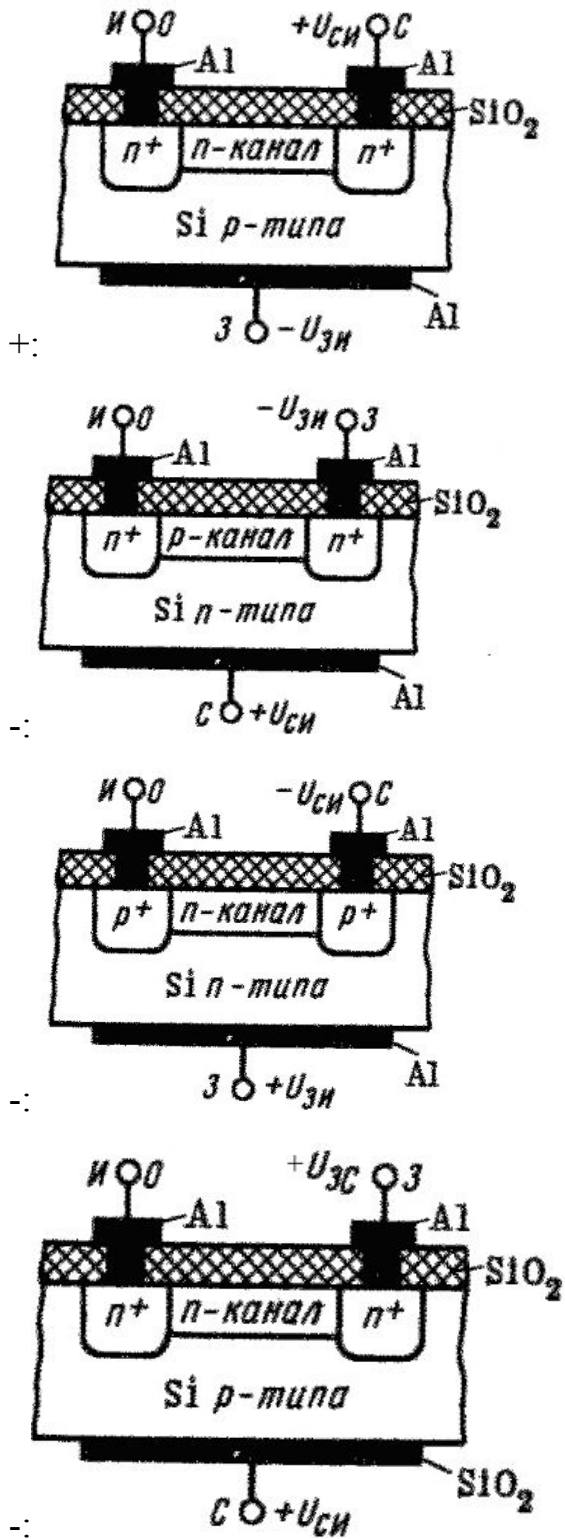
-: структура МОП- транзистора с индуцированным каналом

-: структура МДП- транзистора со встроенным каналом

-: структура МОП- транзистора со встроенным каналом

I:

S: Структура полевого транзистора с одним управляющим p-n- переходом



I:

S: Схема с общим затвором аналогична схеме с...

-: общим эмиттером у биполярных транзисторов

-: общим коллектором у биполярных транзисторов

+ : общей базой у биполярных транзисторов

I:

S: Схема с общим стоком подобна схеме...

- : коллекторного повторителя на биполярном транзисторе и ее называют истоковым повторителем

+ : эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе и ее называют истоковым повторителем

- : эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе и ее называют стоковым повторителем

I:

S: Схема с общим истоком (подобно общему эмиттеру) позволяют получить...

- : усиление тока и напряжения и инвертирование фаз напряжения при усилении, имеют очень высокое входное и низкое выходное сопротивления

+ : усиление тока и напряжения и инвертирование фаз напряжения при усилении, имеют очень высокое входное и выходное сопротивления

- : усиление тока и напряжения и инвертирование фаз напряжения при усилении, имеют очень низкое входное и высокое выходное сопротивления

Вопросы, выносимые на коллоквиум

Коллоквиум 1

1. Классификация и назначения материалов электронной техники.
2. Основные свойства полупроводников. Проводимость полупроводников.
3. Образование электронно – дырочного перехода.
4. Энергетические диаграммы $p - n$ перехода в равновесии и при смещениях.
5. Высота потенциального барьера и контактная разность потенциалов.
6. Диодная теория ВАХ. Реальная ВАХ $p - n$ перехода.
7. Диффузионная теория. Энергетическая диаграмма $p - i - n$ перехода

- в равновесии. Ток по диффузионной теории через $p - i - n$ переход.
8. Емкость диода. Барьерная и диффузионная емкость и их зависимости от напряжения.
 9. Пробой $p - n$ перехода. Туннельный пробой. Температурная зависимость пробивного напряжения.
 10. Лавинный пробой. Связь коэффициента лавинного размножения с коэффициентом ударной ионизации.
 11. Температурная зависимость пробивного напряжения. Тепловой пробой.
 12. Энергетические диаграммы контакта металл - полупроводник.
 13. Обедненные (запорные) и обогащенные (антизапорные слои).
 14. Распределение объемного заряда и электрического поля в переходе металл – полупроводник.
 15. Ширина обедненного слоя в равновесии и при смещениях.
 16. ВАХ диодов с контактом Шоттки. Омический контакт.
17. Биполярный транзистор. Структура. Режимы работы. Схемы включения.
 18. Принцип работы БТ. Коэффициенты усиления при различных схемах включения.
 19. Статические параметры при различных режимах работы БТ.
 20. Статические характеристики в схемах с ОБ и ОЭ.

Коллоквиум 2

1. Пробой транзистора.
 2. Тиристоры. Структура диодного тиристора (динистора). Принцип работы. ВАХ динистора.
 3. Триодный тиристор (тринистор). Принцип действия. ВАХ тринистора в закрытом состоянии.
 4. Полевой транзистор с управляющим $p - n$ переходом. Структура и принцип работы.
 5. Статические характеристики и малосигнальные параметры полевого транзистора. Частотные характеристики.
 6. МДП - транзистор с индуцированным каналом. Структура. Принцип работы. Статические характеристики.
 7. МДП – транзистор с встроенным каналом. Структура. Принцип работы. Статические характеристики.
 8. Приборы с зарядовой связью. Структура. Принцип действия. Характеристики и параметры.
9. Туннельный диод. Принцип действия. Зонные диаграммы ВАХ.
 10. Эквивалентная схема ТД. Основные параметры. Обращенный диод.
 11. Лавинно – пролетный диод. Условия появления отрицательного динамического сопротивления и его физический смысл.

12. Структура и принцип действия ЛДП. Лавинно – пролетный режим. Режим с захваченной плазмой.
13. Эффект Ганна. Междолинный переход электронов и ОДС. Принцип действия диода Ганна. Пролетный режим.
14. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов.
15. Полупроводниковые приборы отображения информации и инфракрасные излучающие диоды.
16. Лазеры. Принцип действия.
17. Конструкция и технология изготовления инжекционных лазеров. Основные характеристики и параметры.
18. Фоторезисторы и фотодиоды. Технология изготовления и конструкция.
19. Основные характеристики и параметры фоторезисторов и фотодиодов. Фотоэлементы, фототранзисторы и фототиристоры. Основные параметры и характеристики.

3.2 Оценочные материалы для промежуточной аттестации

Экзамен проводится по билетам. В каждом билете 2 теоретических вопроса.

Экзаменационные вопросы

1. Диффузионный ток в полупроводниках. Закон полного тока.
2. Уравнение непрерывности. Диффузионная длина носителей заряда.
3. Виды электрических контактов, требования к ним.
4. P-n-переход в равновесии.
5. P-n-переход в смещении.
6. ВАХ идеального и реального p-n-перехода.
7. Принцип действия, режимы работы, характеристики, условное графическое обозначение и маркировка диодов: выпрямительных, ВЧ, импульсных.
8. Принцип действия, режимы работы, характеристики, условное графическое обозначение и маркировка диодов: варикапов, стабилитронов, стабилиторов.
9. Принцип действия, ВАХ, обозначение туннельного диода.
10. Выпрямляющий контакт металл-полупроводник в равновесии.
11. Выпрямляющий контакт металл-полупроводник в смещении. Диодная и диффузионная теории выпрямления.
12. Контакт металл – полупроводник с омическими свойствами. Способы формирования.
13. Структура и принцип действия биполярных транзисторов.
14. Режимы работы, схемы включения, параметры биполярных транзисторов.
15. Особенности ВАХ, дифференциальные коэффициенты передачи биполярного транзистора,

- включенного по схеме ОБ.
16. Особенности ВАХ, дифференциальные коэффициенты передачи биполярного транзистора, включенного по схеме ОЭ.
 17. Структура и принцип действия тиристорov.
 18. Типы тиристорov. Схемы включения, параметры и ВАХ тиристорov.
 19. Эффект поля. МДП-структура. Поверхностная проводимость.
 20. Вольтфарадные характеристики МДП-структуры. Поверхностный варикап.
 21. Структура и принцип действия МДП-транзисторов с индуцированным каналом.
 22. ВАХ и параметры МДП-транзисторов с индуцированным каналом.
 23. Структура и принцип действия МДП-транзисторов со встроенным каналом.
 24. ВАХ и параметры МДП-транзисторов со встроенным каналом.
 25. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов.
 26. Полупроводниковые приборы отображения информации и инфракрасные излучающие диоды.
 27. Лазеры. Принцип действия. Конструкция и технология изготовления инжекционных лазеров. Основные характеристики и параметры.
 28. Фоторезисторы. Технология изготовления и конструкция. Основные характеристики и параметры.
 29. Фотодиоды. Технология изготовления и конструкция. Основные характеристики и параметры.
 30. Фотоэлементы, фототранзисторы и фототиристоры. Основные параметры и характеристики.