

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

В. М. Ицкович

ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное методическое пособие

2017

Корректор: А. Н. Миронова

Ицкович В. М.

Электроника : учебное методическое пособие / В. М. Ицкович ;
под ред. В. А. Шалимова. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2017. – 76 с.

© Ицкович В.М., 2017

© Оформление.

ФДО, ТУСУР, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Требования к выполнению контрольной и лабораторных работ.....	5
2 Указания по выполнению контрольной и лабораторных работ.....	6
3 Контрольная работа № 1	12
3.1 Методические указания по выполнению контрольной работы № 1	12
3.2 Задания для контрольной работы № 1	16
4 Лабораторная работа № 1	36
4.1 Методические указания по выполнению лабораторной работы № 1.....	36
4.2 Задания для лабораторной работы № 1	44
5 Лабораторная работа № 2	64
5.1 Методические указания по выполнению лабораторной работы № 2.....	64
5.2 Задания для лабораторной работы № 2	69

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электроника» рассматривает вопросы, связанные с физикой полупроводниковых материалов, и на их основе разработку полупроводниковых приборов различного назначения с последующим переходом на микроэлектронику.

Учебное пособие В. М. Ицковича «Электроника» (2017, в 2 ч.) обеспечивает необходимый объем материалов для полного изучения учебной дисциплины. Для контроля качества изученного материала в конце каждой главы приводятся вопросы для самопроверки, которые позволяют студенту проконтролировать степень усвоения изученного материала.

Данное учебное методическое пособие предназначено для организации самостоятельной работы студентов, обучающихся по дистанционной технологии.

Учебное методическое пособие по дисциплине «Электроника» содержит одну контрольную работу и две лабораторные работы, в каждой из которых имеется 10 вариантов. Каждый вариант состоит из 3–5 задач.

Все работы ориентированы на учебное пособие В. М. Ицковича «Электроника» (в 2 ч.). Если студент пользуется другой литературой, то при решении некоторых задач могут возникнуть затруднения. Кроме того, все обозначения и сокращения, используемые в работах, полностью совпадают с обозначениями учебного пособия, что значительно упрощает решение задач.

Первая контрольная работа охватывает разделы: физика полупроводниковых материалов, теория образования p - n -перехода, контакты металл – полупроводник и теория полупроводниковых диодов.

Первая лабораторная работа позволяет закрепить материал, посвященный теории биполярных и полевых транзисторов.

Вторая лабораторная работа охватывает раздел «Транзисторные ключи» и разделы микроэлектроники.

ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ И ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Оформление пояснительной записки должно соответствовать требованиям образовательного стандарта вуза ОС ТУСУР 01–2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления» (<https://regulations.tusur.ru/documents/70>).

Принципиальные электрические и функциональные схемы должны выполняться с полным соблюдением государственных стандартов.

Выводы к задаче считаются одним из важнейших пунктов решенной задачи.

Все математические выводы необходимо сопровождать пояснениями и ссылками на теоретический материал.

При написании выводов необходимо ссылаться на физические принципы процессов, а не на формулы или графики.

В случае если работа ***не зачтена и отправлена на доработку***, после устранения ошибок на повторную проверку необходимо высылать работу полностью, а не исправления и уточнения.

Работы, выполненные частично, не проверяются и возвращаются студенту.

УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ И ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению работ целесообразно приступать после того, как изучена теоретическая часть. При изучении теоретического материала основное внимание необходимо уделять физическим процессам в полупроводниках и приборах на их основе. Поэтому первый раздел учебного пособия, посвященный физике полупроводниковых материалов, является фундаментом, на котором базируется последующее изучение всех полупроводниковых приборов. Необходимо помнить, что формулы позволяют сделать количественную оценку того или иного процесса, но не изучить физику происходящих процессов.

Основные постоянные полупроводниковых материалов, которые потребуются при решении задач, приведены в табл. 2.1, а основные константы – в табл. 2.2.

Таблица 2.1 – Основные параметры некоторых полупроводников

Параметр	Полупроводник			
	Крем- ний	Герма- ний	Соеди- нение GaAs	Соеди- нение InSb
Заряд ядра	14	32	–	–
Атомный вес	28,1	72,6	–	–
Диэлектрическая проницае- мость, отн. ед.	12	16	11	16
Температура плавления, °C	1420	940	1280	520
Коэффициент теплопроводно- сти λ , $\frac{\text{Вт}}{(\text{см} \cdot ^\circ\text{C})}$	1,2	0,55	–	–
Удельная теплоёмкость c , $\frac{\text{Дж}}{(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})}$	0,75	0,41	–	–
Эффективная масса электронов m_n , отн. ед.	0,33	0,22	0,07	0,013
Эффективная масса дырок m_p , отн. ед.	0,55	0,39	0,5	0,6

Окончание табл. 2.1

Параметр	Полупроводник			
	Крем- ний	Герма- ний	Соеди- нение GaAs	Соеди- нение InSb
Ширина запрещенной зоны φ_3 , В	1,11	0,67	1,4	0,18
Эффективная плотность состояний N_C , см^{-3}	$2,8 \cdot 10^{19}$	10^{19}	—	—
Эффективная плотность состояний N_V , см^{-3}	10^{19}	$0,61 \cdot 10^{19}$	—	—
Подвижность электронов μ_n , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	1200– 1450	3800	11000	65000
Подвижность дырок μ_p , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	500	1800	450	700
Собственное удельное сопротивление ρ_i , Ом·см	$2 \cdot 10^5$	60	$4 \cdot 10^8$	—
Собственная концентрация n_i , см^{-3}	$2 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^8$	—
Коэффициент диффузии электронов D_n , $\text{см}^2/\text{с}$	36	100	290	1750
Коэффициент диффузии дырок D_p , $\text{см}^2/\text{с}$	13	45	12	17
Критическая напряженность поля $E_{\text{кр } n}$, В/см	2500	900	—	—
Критическая напряженность поля $E_{\text{кр } p}$, В/см	7500	1400	—	—
Максимальная скорость, $\text{см}/\text{с}$	10^7	$6 \cdot 10^6$	—	—

Таблица 2.2 – Основные физические константы, используемые в теории полупроводников

Основные физические константы	Приближенные значения
Элементарный заряд	$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса свободного электрона	$m = 9 \cdot 10^{-31}$ кг
Постоянная Планка	$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж/°С
Постоянная Больцмана	$K = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума)	$\epsilon_0 = 19 \cdot 10^{-14}$ Ф/см
Магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума)	$\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-8}$ Г/см
Число Авогадро (количество атомов в 1 грамм-атоме вещества)	$N_0 = 6 \cdot 10^{23}$

При составлении задач автор стремился к тому, чтобы численные расчеты были минимизированы.

К решению задач необходимо подходить творчески, т. е. постараться минимизировать вычисления. Для этого в ряде задач следует прежде преобразовать основную формулу к другому виду. Чаше новая форма записи оказывается более громоздкой, но сокращает время, иногда значительно, на вычисления.

ПРИМЕР 1

Требуется рассчитать значения температурного потенциала φ_T при изменении температуры от -40° до 50° С.

$$\varphi_T = \frac{KT}{q}, \quad (1)$$

где K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – заряд электрона.

Умножив и разделив правую часть выражения (1) на $T_0 = 300$ К (комнатная температура), получим

$$\varphi_T = \varphi_{T_0} \frac{T}{T_0} = 8,33 \cdot 10^{-5} T, \quad (2)$$

где $\varphi_{T0} = 25 \text{ мВ}$ – температурный потенциал при комнатной температуре.

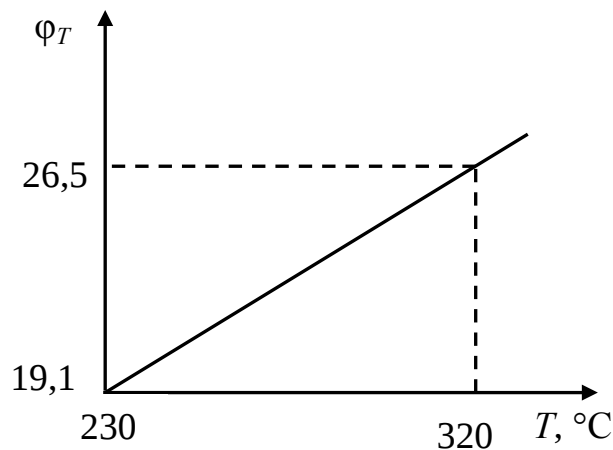
Новая форма записи не только уменьшает время, которое требуется для проведения расчетов, но и делает формулу более наглядной с точки зрения зависимости температурного потенциала от температуры.

Разобьем весь температурный диапазон на 10 точек.

Для каждой точки рассчитаем температурный потенциал и результаты сведем в таблицу.

T	230	240	250	260	270	2800	2900	300	310	320
φ_T	19,1	20	20,8	20,6	22,5	23,3	24,2	25	25,7	26,5

По данным таблицы строим график.



Из выражения (2) следует, что температурный потенциал является линейной функцией от температуры, следовательно, для построения графика достаточно было вычислить значения температурного потенциала для двух значений температуры.

Выводы

С физической точки зрения температурный потенциал характеризует в электрических единицах статистическую температуру или кинетическую энергию электрона в вакууме или электронном газе. С повышением температуры кинетическая энергия электрона растет, что приводит к увеличению температурного потенциала. Кроме того, можно сделать заключение, что при

температуре полупроводника $T = 0$ температурный потенциал равен нулю, а следовательно, кинетическая энергия электронов и дырок равна нулю и электронов в зоне проводимости нет. Валентные уровни все заполнены. Таким образом, нет свободных подвижных зарядов в полупроводнике и его проводимость равна нулю. Это заключение справедливо для любого типа полупроводника.

ПРИМЕР 2

Имеется электронный полупроводник с концентрацией электронов n . Необходимо доказать, что выполняется условие

$$\varphi_F = \varphi_C - \frac{\varphi_3}{2} + \varphi_T \ln \frac{n_i}{p}.$$

Для невырожденного электронного полупроводника уровень Ферми равен

$$\varphi_F = \varphi_C + \varphi_T \ln \frac{n}{N_C}, \quad (1)$$

где $\varphi_T \ln \frac{n}{N_C} = \chi$ – химический потенциал; φ_C – потенциал «дна» зоны проводимости; N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости.

Из теории полупроводниковых материалов известно соотношение

$$np = n_i^2, \quad (2)$$

где n_i – концентрация носителей в собственном полупроводнике; n и p – концентрации основных и неосновных носителей заряда в примесном полупроводнике.

Обратите внимание на то, что произведение концентраций основных и неосновных носителей при постоянной температуре есть величина, зависящая только от типа полупроводникового материала. Увеличение концентрации одних носителей, например электронов, ведет к уменьшению концентрации дырок. Это можно объяснить тем, что увеличение концентрации электронов достигается введением дополнительных доноров. При этом концентрация электронов в зоне проводимости увеличивается,

а следовательно, и уровни вблизи «дна» зоны проводимости оказываются занятыми.

Переход электронов из валентной зоны на более высокие уровни практически исключается.

Выражая концентрацию основных носителей заряда через собственную концентрацию и концентрацию неосновных носителей и подставляя в формулу (1), получаем

$$\varphi_F = \varphi_C + \varphi_T \ln \frac{n_i^2}{pN_C}. \quad (3)$$

Известно, что собственные концентрации, эффективные плотности состояний N_C в зоне проводимости и N_V в валентной зоне связаны соотношением

$$n_i = p_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\varphi_3/2\varphi_T}. \quad (4)$$

Полагая, что $N_C \approx N_V$, можно записать

$$N_C = n_i e^{\varphi_3/2\varphi_T}. \quad (5)$$

Подставляя значение N_C из (5) в (3), получим

$$\varphi_F = \varphi_C - \frac{\varphi_3}{2} + \varphi_T \ln \frac{n_i}{p};$$

$\varphi_C - \frac{\varphi_3}{2} = \varphi_E$ — электрический потенциал, соответствующий середине запрещенной зоны.

Тождество доказано.

Выводы

1. Учитывая, что в электронном полупроводнике выполняется условие $n > p$, можно сделать вывод: в электронном полупроводнике уровень Ферми сдвинут относительно середины запрещенной зоны в сторону зоны проводимости. Чем выше концентрация электронов, тем ближе уровень Ферми к зоне проводимости и тем меньше концентрация дырок, неосновных носителей.

2. Если выполняется условие $n = N_C$, уровень Ферми равен $\varphi_F = \varphi_C$, т. е. расположен на уровне «дна» зоны проводимости. Это условие можно принять за критерий вырождения полупроводника.

3 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

3.1 Методические указания по выполнению контрольной работы № 1

Для успешного решения первой контрольной работы следует изучить и понять физические свойства собственных и примесных полупроводников. Для какой цели вводятся примеси и как изменяются при этом электрические свойства полупроводников, и в первую очередь удельная проводимость.

Четко представлять физический смысл потенциала Ферми ϕ_F , электростатического потенциала ϕ_E , потенциала, характеризующего ширину запрещенной зоны ϕ_Z , температурного потенциала ϕ_T , химического потенциала χ и как будут изменяться эти потенциалы при изменении концентрации примесей. Знать зависимость этих потенциалов от температуры. Необходимо помнить, что потенциал Ферми ϕ_F является функцией концентрации и ее изменение ведет к изменению уровня Ферми. Подумайте, почему.

Необходимо помнить, что в полупроводнике или системе полупроводников, находящихся в термодинамическом равновесии, потенциал Ферми постоянен, а его градиент равен нулю, но при этом могут иметь место диффузионные и дрейфовые токи. Результирующий ток при этом равен нулю. Почему?

Необходимо четко представлять, почему в примесном полупроводнике концентрация основных носителей не зависит от температуры в рабочем диапазоне температур, а концентрация неосновных носителей очень сильно зависит от температуры.

Изучая зонные, *энергетические*, диаграммы, обратите основное внимание на их принципиальную важность как для понимания физики процессов, происходящих в полупроводнике или системе полупроводников, так и для количественных оценок. Помните, что в зонных диаграммах энергетические уровни с положительным потенциалом находятся ниже. Так, потенциал «дна» зоны проводимости ϕ_C меньше потенциала «потолка» валентной зоны ϕ_V . На рис. 3.1 приведены зонные диаграммы полупроводника.

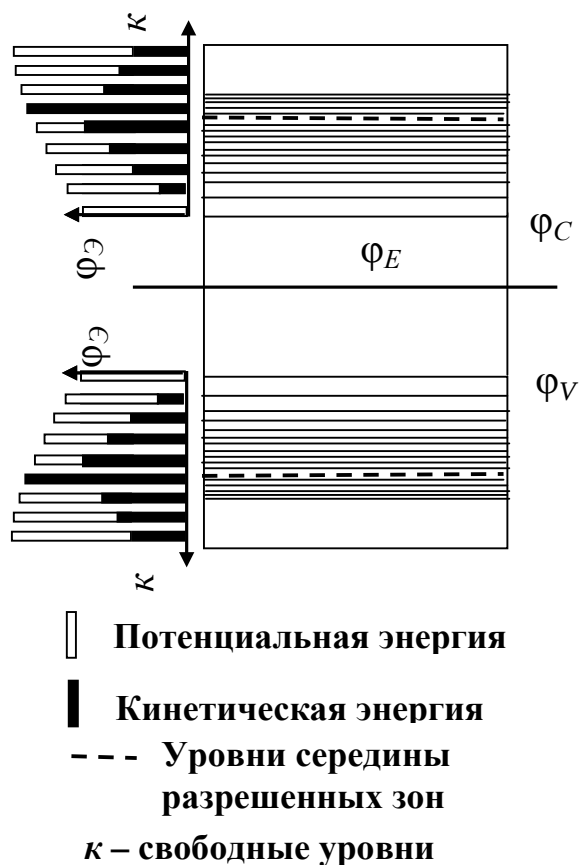


Рис. 3.1

Из анализа энергетических диаграмм можно сделать следующие выводы.

1. Плотность уровней в глубь разрешенных зон увеличивается.

При энергии, отличающейся от граничных энергий, т. е. энергий «дна» и «потолка» разрешенных зон, на $3\varphi_T$, плотность уровней увеличивается примерно в 2 раза, а вероятность нахождения электронов и дырок на этих уровнях уменьшается примерно в 20 раз. Таким образом, количество электронов и дырок на уровнях вдали от «дна» зоны проводимости и «потолка» валентной зоны пренебрежимо мало.

2. Электроны (дырки), находящиеся на граничных уровнях, обладают только потенциальной энергией, а следовательно, неподвижны.

3. Электроны (дырки), находящиеся на уровнях, отличных от граничных, кроме потенциальной энергии обладают и кинетической энергией.

4. Максимальной кинетической энергией обладают электроны (дырки), находящиеся на уровнях середины разрешенных зон.

Вероятность нахождения на этих уровнях носителей практически равна нулю. Следовательно, проводимость обусловлена в основном носителями, находящимися на уровнях вблизи граничных значений.

Для полупроводников и приборов на их основе принципиально важным является условие нейтральности и принцип диэлектрической релаксации в полупроводниках. Помните, что физический смысл условия нейтральности в том, что в полупроводниках независимо от их состояния не могут длительное время существовать объемные заряды. Время существования объемного заряда оценивается на уровне времени диэлектрической релаксации $10^{-11} - 10^{-13}$ с, что на 10^5 больше времени жизни носителей.

Рассматривая принцип образования перехода, сосредоточьте основное внимание на физических процессах, происходящих при объединении двух полупроводниковых материалов с разным типом проводимости. Объединение полупроводников с разным типом проводимостей приводит к диффузии носителей вследствие разности химических потенциалов одноименных носителей в полупроводниках разного типа проводимости.

При изучении перехода тщательно проанализируйте рис. 2.5 учебного пособия.

Из рисунка следует, что величина диффузионного потенциала равна:

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_{F_p} - \varphi_{F_n},$$

где φ_{F_p} и φ_{F_n} – потенциалы Ферми в дырочном и электронном полупроводниках до образования перехода.

Объяснить принцип образования *p-n*-перехода можно только с позиций энергии, которую имеют электроны и дырки, что демонстрируется с помощью зонных диаграмм (рис. 3.2). Требование постоянства уровня Ферми для системы полупроводников, находящихся в термодинамическом равновесии, приводит к искривлению уровней в полупроводниках и образованию потенциального барьера. Обратите внимание на то, что чем ближе уровень Ферми к разрешенной зоне, тем больше диффузионный потенциал, тем большей энергией должны обладать дырки полупроводника *p*, чтобы перейти в полупроводник *n*. Аналогичное заключение можно сделать и об электронах полупроводника *n*.

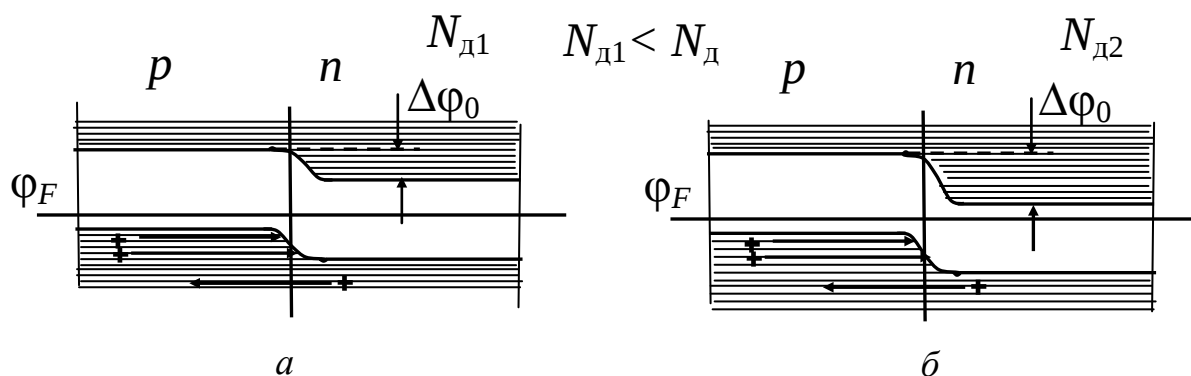


Рис. 3.2

Обратите внимание на то, что для дырок полупроводника n -типа и электронов полупроводника p -типа нет потенциального барьера для перехода их в смежные слои. В дырочном и электронном полупроводниках есть дырки и электроны, способные преодолеть потенциальный барьер и перейти в слой с другим типом проводимости. Поток дырок с высокой энергией из p -полупроводника уравнивается потоком дырок из n -полупроводника, система полупроводников находится в состоянии термодинамического равновесия. Аналогичный процесс относится и к электронам. Результирующий ток равен нулю. Система полупроводников находится в состоянии термодинамического равновесия.

При изучении систем металл – полупроводник независимо от типа образовавшихся контактов переход не образуется, а следовательно, нет инжекции или экстракции носителей, что исключает режим накопления или рассасывания зарядов. Если при образовании контактов в областях, прилегающих к металлургической границе, концентрации оказываются пониженными, контакты называются выпрямляющими, т. е. обладают вентильными свойствами. Приборы на основе выпрямляющих контактов имеют очень высокое быстродействие, что выгодно отличает их от приборов, работающих с использованием переходов.

При изучении диодов обратите внимание на различие статических вольт-амперных характеристик для идеального и реального диодов и почему эти отличия возникают.

При изучении параграфа 3.2 «Полупроводниковые стабилитроны» учебного пособия основное внимание следует обратить на работу этих приборов как стабилизаторов напряжения

в источниках питания, а также на то, какими свойствами должна обладать статическая вольт-амперная характеристика для обеспечения высокой степени стабилизации напряжения.

Параграф 3.3 «Туннельные диоды» учебного пособия следует прочитать с целью ознакомления с приборами, в которых используются вырожденные полупроводники.

3.2 Задания для контрольной работы № 1

ВАРИАНТ 1

Задача 1

Имеется кремниевый электронный полупроводник.

а) Докажите, что выполняется условие $n = n_i e^{\frac{\varphi_F - \varphi_C}{2\varphi_T}}$, если уровень Ферми $\varphi_F = \varphi_C$ и $N_C = N_V$.

б) Рассчитайте концентрацию электронов для пункта а) при изменении температуры от -50 до 100 °С. Постройте график и дайте физическое объяснение.

Задача 2

а) Покажите, что эффективная плотность энергетических уровней в пределах зоны $1.2 \varphi_T$ вблизи края зоны проводимости составляет

$$N_C = \frac{11.14}{h^3} (2mq\varphi_T)^{3/2}.$$

б) Используя выражение пункта а), рассчитайте эффективную плотность состояний N_C при изменении температуры от -60 до 110 °С. Постройте график и сделайте необходимые пояснения.

Задача 3

Постройте энергетические диаграммы для перехода из германия, приняв за нулевой потенциал «дна» зоны проводимости дырочного полупроводника.

Потенциалы Ферми в дырочном и электронном полупроводниках соответственно равны:

$$\varphi_{Fn} = \varphi_C - 4\varphi_T; \varphi_{Fp} = \varphi_V + 2\varphi_T.$$

Зонные диаграммы постройте для трёх значений напряжений внешнего источника:

$$U = 0; \quad U = 6\varphi_T; \quad U = -6\varphi_T.$$

Замечание. Необходимо построить зонные диаграммы, а не высоту потенциального барьера.

Объясните полученные результаты.

Задача 4

Постройте энергетические диаграммы для перехода, образованного полупроводниками из германия.

Потенциалы Ферми для электронного и дырочного полупроводников соответственно равны:

$$\varphi_{Fn} = \varphi_C - 4\varphi_T; \varphi_{Fp} = \varphi_V + 2\varphi_T.$$

Зонные диаграммы постройте для трех значений внешних напряжений, приложенных к переходу:

$$U = 0; \quad U = 6\varphi_T; \quad U = -6\varphi_T.$$

Замечание. Необходимо построить зонные диаграммы, а не высоту потенциального барьера.

Объясните полученные результаты.

Задача 5

Имеются диоды, изготовленные из полупроводниковых материалов германия и кремния с одинаковыми площадями и одинаковыми временами жизни τ_∞ носителей зарядов.

а) Докажите, что для отношения токов термогенерации выполняется условие

$$\frac{I_{G, Si}}{I_{G, Ge}} = e^{\frac{\varphi_{3, Ge} - \varphi_{3, Si}}{\varphi_T}},$$

где $I_{G, Si}$ и $I_{G, Ge}$, $\varphi_{3, Si}$ и $\varphi_{3, Ge}$ — токи термогенерации и ширина запрещенной зоны в кремниевом и германиевом полупроводниках соответственно.

Сделайте необходимые выводы.

б) Рассчитайте зависимости токов термогенерации для кремниевого и германиевого диодов при изменении температуры от -50 до 100 °С. Значения токов термогенерации при комнатной температуре равны: $I_{G0.Si} = 10^{-6}$ А и $I_{G0.Ge} = 10^{-5}$ А. Постройте график и объясните полученный результат.

ВАРИАНТ 2

Задача 1

Рассчитайте распределение концентрации носителей при монополярной диффузии в кремниевом и германиевом полупроводниках при $\Delta p = 10^{15}$ и времени жизни носителей 5 мкс в интервале температур -50 + 150 °С. Постройте график и дайте физическое объяснение.

Задача 2

Постройте график распределения Ферми – Дирака для значений аргумента, близких уровню Ферми $\varphi_F = 1$ эВ. Дайте физическую интерпретацию данной кривой.

Задача 3

Постройте энергетические диаграммы для перехода из германия. Примите за ноль потенциал «дна» зоны проводимости в дырочном полупроводнике. Потенциалы Ферми для дырочного и электронного полупроводников соответственно равны:

$$\varphi_{Fn} = \varphi_C - 8\varphi_T, \varphi_{Fp} = \varphi_{FV} + 4\varphi_T.$$

Диаграммы постройте для трех случаев.

а) Внешнее напряжение $U = 0$.

б) Внешнее напряжение $U = 12\varphi_T$.

в) Внешнее напряжение $U = -12\varphi_T$.

Сравните полученные диаграммы и сделайте выводы.

Замечание. Необходимо построить зонные диаграммы, а не высоту потенциального барьера.

Задача 4

Постройте энергетические диаграммы для перехода из кремния.

Потенциалы Ферми для дырочного и электронного полупроводников соответственно равны:

$$\varphi_{Fn} = \varphi_C - 10\varphi_T; \quad \varphi_{Fp} = \varphi_V + 6\varphi_T.$$

Зонные диаграммы постройте для трех значений внешних напряжений, приложенных к переходу:

$$U = 0; \quad U = 16\varphi_T; \quad U = -16\varphi_T.$$

Замечание. Необходимо построить зонные диаграммы, а не высоту потенциального барьера.

Объясните полученные результаты.

Задача 5

а) Докажите справедливость отношения

$$\frac{r_d}{R_{ст}} = \frac{\varphi_T I}{(I + I_0)U} \approx \frac{\varphi_T}{U},$$

где r_d и $R_{ст}$ дифференциальное и статическое сопротивления диодов соответственно; I , I_0 – прямой и тепловой токи диода.

б) Докажите, что при $U = 0$ $\frac{r_d}{R_{ст}} = 1$.

в) Рассчитайте зависимость $\frac{r_d/R_{ст}}{r_{d0}/R_{ст0}} = \frac{T}{T_0}$, где r_{d0} и $R_{ст0}$ –

дифференциальное и статическое сопротивления при комнатной температуре при изменении температуры от -40 до 80 °С, и постройте график.

ВАРИАНТ 3

Задача 1

Рассчитайте величину демберовского напряжения в кремниевом полупроводнике, если

$$\sigma = 5 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}; \Delta p(0) = \Delta n(0) = 10^{14} - 10^{16}.$$

Постройте график и дайте физическое объяснение.

Объясните, какой вид диффузии имеет место: монополярная или биполярная диффузия.

Задача 2

а) Получите выражение уровня Ферми в собственном полупроводнике относительно середины запрещенной зоны.

б) Подсчитайте смещение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны в собственном полупроводнике из германия и кремния при комнатной температуре.

Задача 3

Постройте энергетические диаграммы для перехода, образованного полупроводниками из кремния. Примите за ноль потенциал «дна» зоны проводимости в дырочном полупроводнике. Потенциалы Ферми для дырочного и электронного полупроводников определяются следующими выражениями:

$$\varphi_{Fn} = \varphi_C - 8\varphi_T, \varphi_{Fp} = \varphi_{FV} + 4\varphi_T.$$

Диаграммы постройте для трех случаев.

а) Внешнее напряжение $U = 0$.

б) Внешнее напряжение $U = 12\varphi_T$.

в) Внешнее напряжение $U = -12\varphi_T$.

Замечание. Необходимо построить зонные диаграммы, а не высоту потенциального барьера.

Сравните полученные диаграммы и сделайте выводы.

Задача 4

Постройте энергетические диаграммы для перехода, образованного полупроводниками из германия.

Потенциалы уровня Ферми для дырочного и электронного полупроводников соответственно равны:

$$\varphi_{Fn} = \varphi_C - 10\varphi_T; \quad \varphi_{Fp} = \varphi_V + 2\varphi_T.$$

Зонные диаграммы постройте для трех значений внешних напряжений, приложенных к переходу:

$$U = 0; \quad U = 12\varphi_T; \quad U = -12\varphi_T.$$

Замечание. Необходимо построить зонные диаграммы, а не высоту потенциального барьера.

Задача 5

а) Докажите, что отношение токов термогенерации и теплового для германиевого и кремниевого диодов определяется выражениями:

$$f_1 = \left(\frac{I_G}{I_0} \right)_{\text{Ge}} = \frac{e^{\varphi_{3,\text{Ge}}/2\varphi_T}}{\rho_{\delta} q N_C (\mu_n + \mu_p) L} \frac{l}{L};$$

$$f_2 = \left(\frac{I_G}{I_0} \right)_{\text{Si}} = \frac{e^{\varphi_{3,\text{Si}}/2\varphi_T}}{\rho_{\delta} q N_C (\mu_n + \mu_p) L} \frac{l}{L},$$

где l – ширина перехода; L – диффузионная длина. При выводе формул считайте $N_C = N_V$.

Сделайте вывод.

б) Докажите справедливость соотношения

$$\frac{f_1}{f_2} = e^{\frac{\varphi_{3,\text{Ge}} - \varphi_{3,\text{Si}}}{\varphi_T}}.$$

Объясните это тождество с позиций физики процесса.

в) Рассчитайте отношение пункта а) $\frac{f_1}{f_2}$ при изменении температуры от -50 до 100 °С. Постройте график и сделайте выводы.

ВАРИАНТ 4

Задача 1

а) Рассчитайте распределение концентрации носителей при монополярной диффузии в кремниевом и германиевом полупроводниках при $\Delta p = 10^{14} - 10^{16}$ и времени жизни носителей 2 мкс. Расчет сделать при комнатной температуре. Постройте график и дайте физическое объяснение.

Задача 2

а) Покажите, что в слаболегированном полупроводнике p -типа удельное сопротивление максимально, если $\frac{\mu_n}{\mu_p} > 1$.

б) Вычислите концентрацию акцепторных атомов N_a , которая потребуется для достижения максимального удельного сопротивления. Примите для кремния $\frac{\mu_n}{\mu_p} = 2,4$; $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Задача 3

Переход образован полупроводниками из кремния.

а) Докажите, что справедливо равенство

$$\Delta\phi_0 = \phi_{T0} \left(\frac{T}{T_0} \right) \ln K \frac{n_{n0}^2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-3}}{N_{V0} N_{C0} e^{-\frac{\phi_{T0}}{T}}},$$

где $T_0 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_{n0} = 7 \cdot 10^{17}$; $K = \frac{p_{p0}}{n_{n0}} = 7$; $\phi_{T0}, N_{C0}, N_{V0}$ – значения параметров при комнатной температуре.

Обоснуйте с физических позиций справедливость приведенного выше выражения.

б) Рассчитайте зависимость диффузионного потенциала при изменении температуры от -50 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Постройте график.

в) Объясните, почему в выражении пункте а) считаем, что n_{n0} не зависит от температуры.

Задача 4

Постройте энергетические диаграммы для перехода из кремния, приняв за нулевой потенциал «дна» зоны проводимости дырочного полупроводника. Диаграммы постройте для трёх значений напряжений внешнего источника:

$$U = 0; U = 12\phi_T; U = -12\phi_T.$$

Потенциалы Ферми в дырочном и электронном полупроводнике определяются формулами:

$$\phi_{Fn} = \phi_C - 10\phi_T; \phi_{Fp} = \phi_V + 2\phi_T.$$

Замечание. Необходимо построить зонные диаграммы, а не высоту потенциального барьера.

Задача 5

а) Докажите, что для реального диода дифференциальное сопротивление определяется выражением

$$\frac{dU_{\text{д}}}{dI_{\text{д}}} = r_{\text{д}} + r_{\text{б}},$$

где $r_{\text{д}}$ – дифференциальное сопротивление перехода; $r_{\text{б}}$ – сопротивление базы.

б) Рассчитайте и постройте статическую вольт-амперную характеристику для реального диода: $I_0 = 10^{-6} \text{ А}$, $r_{\text{б}} = 25 \text{ Ом}$.

Объясните, в чем отличие статических вольт-амперных характеристик для реального и идеального диодов.

в) Определите величину тока, при котором напряжения на переходе и базе равны.

ВАРИАНТ 5

Задача 1

Имеется собственный полупроводник из кремния.

а) Докажите, что для потенциала Ферми выполняется соотношение

$$\varphi_F = \varphi_E + \frac{\varphi_T}{2} \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)^{3/2},$$

где m_p^* и m_n^* – эффективные массы дырок и электронов соответственно.

б) Запишите потенциал Ферми при $m_p^* = m_n^*$.

в) Каким должен быть полупроводник (электронный или дырочный), чтобы потенциал Ферми находился точно в середине запрещенной зоны?

Вычислите концентрацию легирующего вещества, при котором выполняется это условие.

Задача 2

Имеется полупроводник из германия при температуре 400 К.

а) Вычислите концентрацию дырок и электронов, если образец легирован атомами сурьмы (элемент пятой группы) с концентрацией $2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

б) Определите концентрацию носителей, которая установится после того, как проведено легирование атомами индия (элемент третьей группы) с концентрацией $4,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Задача 3

Переход образован полупроводниками из германия.

а) Докажите, что высота потенциального барьера равна:

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_T \ln K \frac{n_{n0}^2}{n_i^2}, \quad K = \frac{p_{p0}}{n_{n0}},$$

где p_{p0} , n_{n0} и n_i – исходные концентрации основных носителей в полупроводниках p - и n -типов и собственные концентрации соответственно.

Чему будет равен потенциальный барьер, если оба полупроводника собственные?

б) Рассчитайте величину диффузионного потенциала при $T = 300^\circ\text{C}$, $K = 6$ и $p_{p0} = 6 \cdot 10^{16}$.

Задача 4

Постройте энергетические диаграммы для перехода, образованного полупроводниками из германия, приняв за нулевой потенциал «дна» зоны проводимости дырочного полупроводника. Диаграммы построьте для трёх значений напряжений внешнего источника:

$$U = 0; U = 12\varphi_T; U = -12\varphi_T.$$

Потенциалы Ферми в дырочном и электронном полупроводнике определяются формулами:

$$\varphi_{Fn} = \varphi_C - 12\varphi_T; \varphi_{Fp} = \varphi_V + 4\varphi_T.$$

Замечание. Необходимо построить зонные диаграммы, а не высоту потенциального барьера.

Задача 5

Имеются диоды, выполненные из германиевых и кремниевых полупроводников.

а) Докажите справедливость выражения

$$l/l_0 = \sqrt{1 - \frac{U}{\varphi_{Fp} - \varphi_{Fn}}},$$

где l – ширина перехода; l_0 – ширина перехода в равновесном состоянии; φ_{Fp} , φ_{Fn} – уровни Ферми в примесных полупроводниках до образования перехода.

б) Постройте график относительного изменения ширины перехода в диодах при изменении напряжения (обратное смещение): $\varphi_{Fp} - \varphi_{Fn} = \frac{\varphi_3}{2}$; $\frac{\varphi_3}{1,5}$; φ_3 . Сделайте выводы.

ВАРИАНТ 6

Задача 1

Имеется полупроводник.

а) Докажите справедливость равенства

$$\mu = \frac{l_{\text{ср}} V_T}{3\phi_T},$$

где $l_{\text{ср}}$ – средняя длина свободного пробега.

б) Докажите справедливость равенства

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \sqrt{\frac{T_0}{T}}, \text{ где } T_0 = 300^\circ\text{C}.$$

в) Рассчитайте относительную подвижность заряженных частиц $\frac{\mu(T)}{\mu_0}$ при изменении температуры от -50 до 100°C , где μ_0 – подвижность заряженных частиц при комнатной температуре. Постройте график и сделайте выводы.

Задача 2

Вычислите вероятность нахождения электронов на уровнях $\phi_F + 0,1$ эВ и $\phi_F - 0,1$ эВ при температурах 0, 150, 300, 1000 К. Представьте результаты в табличной форме и сделайте необходимые выводы.

Задача 3

Переход образован полупроводниками из кремния.

Дырочный полупроводник имеет концентрации дырок на порядок больше, чем электронную концентрацию электронов.

а) Докажите, что выполняется соотношение

$$n_{n0} = n_i \sqrt{\frac{e^{\Delta\phi_0/\phi_T}}{K}}, \text{ где } K = \frac{p_{p0}}{n_{n0}}.$$

б) Рассчитайте концентрации носителей в p - и n - полупроводниках при $T = 300^\circ\text{C}$, если $K = 5$, $\Delta\phi_0 = 2\phi_T$, $\Delta\phi_0 = 8\phi_T$.

в) Объясните, как будут изменяться концентрации основных и неосновных носителей в полупроводниках при изменении температуры.

Задача 4

Имеем переход, образованный полупроводниками из кремния.

а) Докажите, что величина теплового тока для тонкой базы и эмиттера определяется выражением

$$I_0 = qS\varphi_T \left(\frac{\mu_{p\delta}}{w_\delta} p_{0\delta} + \frac{\mu_{n\mathcal{E}}}{w_{\mathcal{E}}} n_{0\mathcal{E}} \right),$$

где S – площадь перехода; $\mu_{p\delta}, \mu_{n\mathcal{E}}$ – подвижности дырок и электронов в базе и эмиттере соответственно; $p_{0\delta}, n_{0\mathcal{E}}$ – начальные концентрации носителей в базе и эмиттере; w_δ и $w_{\mathcal{E}}$ – ширина базы и эмиттера соответственно.

Объясните, почему этот ток принято называть тепловым и какими носителями зарядов он обусловлен.

б) Рассчитайте значение теплового тока в переходе, имеющем следующие параметры:

$$S = 0,1 \text{ мм}^2; p_{0\mathcal{E}} = 10^{15}; n_{0\delta} = 10^{14}, w_\delta = w_{\mathcal{E}} = 0,01 \text{ мм}.$$

Объясните, почему величина теплового тока зависит от площади перехода и температуры.

Задача 5

Имеем диоды, выполненные из материалов кремния и германия.

а) Рассчитайте барьерные емкости переходов в равновесном состоянии: $l_0 = 1 \text{ мкм}; S = 0,03 \text{ см}^2$.

б) Докажите справедливость отношения

$$\frac{C_\delta}{C_{\delta 0}} = \sqrt{\frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - U}},$$

где $C_{\delta 0}$ – барьерная емкость перехода в равновесном состоянии.

в) Рассчитайте $C_\delta / C_{\delta 0}$ при изменениях напряжения на переходе:

$$\Delta\varphi_0 = 0,3 \text{ В для германия, } \Delta\varphi_0 = 0,5 \text{ В для кремния}.$$

Расчет сделайте для обратных смещений. Постройте график. Сделайте выводы.

ВАРИАНТ 7

Задача 1

Имеется кремниевый полупроводник с концентрацией дырок $n = 10^{17}$, потенциал «дна» зоны проводимости 3 эВ.

а) Начертите энергетические диаграммы для данного полупроводника.

б) Рассчитайте плотность уровней вблизи «потолка» валентной зоны при изменении потенциала от значения ϕ_V до $\phi_V + 10\phi_T$. Результаты расчетов сведите в таблицу и постройте график. Расчеты проведите для комнатной температуры.

Объясните полученные результаты.

в) Рассчитайте вероятность нахождения дырок на уровнях от значения ϕ_V до $\phi_V + 10\phi_T$. Постройте график.

Объясните полученные результаты.

Задача 2

Вычислите эффективную плотность уровней N_C и N_V для кремния при изменении температуры от -50 до 70 °С. По результатам расчетов постройте график. Объясните полученные результаты.

Задача 3

а) Докажите, что ширина перехода зависит от температуры и определяется выражением:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\zeta_0\zeta \left[\phi_3 + \phi_{T0} \left(\frac{T}{T_0} \right) \ln \frac{N_a N_d \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-3}}{n_i^2} \right]}{q \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)}},$$

где $T_0 = 300$ К; $\phi_{T0}, N_{C0}, N_{V0}$ – тепловой потенциал и эффективные плотности состояний при T_0 .

Объясните полученные результаты с физических позиций.

б) Рассчитайте зависимость ширины перехода от температуры в диапазоне от -50 до 100 °С, если

$$N_a = 310^{18}, N_d = 10^{18}, N_c = N_v = 810^{18}.$$

Постройте график и объясните полученные результаты.

Задача 4

Диод изготовлен из полупроводникового материала кремния и имеет толстую базу $w_b \gg L_b$.

а) Докажите, что справедливо равенство

$$I_0(T) = I_{00} \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 e^{-\varphi_3/\varphi_T},$$

где $I_{00} = qS \sqrt{\frac{D}{\tau}} \frac{N_{C0} N_{V0}}{N_d}$ – ток, не зависящий от температуры;

$\sqrt{\frac{D}{\tau}}$ – не зависит от температуры; N_{C0} и N_{V0} – эффективные плотности состояний при $T = 300$ К; $N_a \gg N_d$.

б) Постройте графики зависимостей $\left(\frac{T}{T_0} \right)^3, e^{-\varphi_3/\varphi_T}$ при изменении температуры от -60 до 100 °С. Вычислите максимальную погрешность, если $\left(\frac{T}{T_0} \right)^3 = 1$.

Задача 5

а) Докажите, что для тонкой базы диффузионная емкость равна $C_d = \frac{I w^2 \tau}{2 L^2 \varphi_T}$.

б) Докажите справедливость соотношения для тонкой базы $C_d r_d = \left(\frac{w}{L} \right)^2 \frac{\tau}{2}$.

в) Рассчитайте и постройте зависимость $C_d r_d$ для случая $\frac{w}{L} = 0,5$ при различных значениях $\tau = (0,5 - 10)$ мкс.

Объясните полученные результаты.

ВАРИАНТ 8

Задача 1

Имеется кремниевый полупроводник с концентрацией электронов $n = 10^{17}$, потенциал «дна» зоны проводимости 2 эВ.

а) Начертите энергетические диаграммы для данного полупроводника.

б) Рассчитайте плотность уровней вблизи «дна» зоны проводимости при изменении потенциала от φ_C до $\varphi_C + 10\varphi_T$. Результаты расчетов сведите в таблицу и постройте график. Расчеты проведите для комнатной температуры. Сделайте выводы по результатам построенных графиков.

в) Рассчитайте вероятность нахождения электронов на уровнях от φ_C до $\varphi_C + 10\varphi_T$. Постройте график. Объясните полученные результаты.

Задача 2

Покажите, что вероятность нахождения электрона или дырки на уровнях с энергией, превышающей уровень Ферми φ_F на величину $\Delta\varphi$, в точности совпадает с вероятностью иметь свободное состояние, энергия которого меньше φ_F на ту же величину $\Delta\varphi$.

Задача 3

Для образования перехода использован кремний.

а) Докажите, что ширина перехода определяется выражением

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\zeta_0\zeta \left[\varphi_3 + \varphi_T \ln \frac{N_d N_a}{N_C N_V} \right]}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)}.$$

Объясните, как будет изменяться ширина перехода при изменении концентрации примесей в одном из полупроводников.

Задача 4

Диод изготовлен из полупроводникового материала германия и имеет толстую базу $w_6 \gg L_6$.

а) Докажите, что тепловой ток перехода можно представить уравнением вида

$$I_0(T) = I_{00} \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 e^{-\varphi_3/\varphi_T},$$

где $I_{00} = qS \sqrt{\frac{D}{\tau}} \frac{N_{C0} N_{V0}}{N_d}$; $\sqrt{\frac{D}{\tau}}$ не зависит от температуры; N_{C0} и N_{V0} – эффективные плотности состояний при $T = 300$ К; $N_a \gg N_d$.

б) Постройте графики зависимостей $\left(\frac{T}{T_0} \right)^3, e^{-\varphi_3/\varphi_T}$ при изменении температуры от -60 до 100 °С. Вычислите максимальную погрешность, если $\left(\frac{T}{T_0} \right)^3 = 1$.

Задача 5

а) Докажите, что для толстой базы диффузионная емкость равна $C_d = \frac{L^2 I}{\varphi_T D}$.

б) Рассчитайте диффузионные емкости для толстой базы $L = 8 \cdot 10^{-6}$ см для германиевого и кремниевого диодов при изменениях прямого тока $I = (0,1 - 2)$ мА.

в) Докажите, что для германиевого и кремниевого диодов справедливо выражение $\frac{C_{д. Ge}}{C_{д. Si}} = \frac{D_{Ge}}{D_{Si}}$, где D_{Si}, D_{Ge} – коэффициенты диффузии.

ВАРИАНТ 9

Задача 1

Имеется собственный полупроводник.

а) Докажите, что выполняются соотношения

$$\varphi_C = \varphi_E + \frac{\varphi_3}{2}; \quad \varphi_V = \varphi_E - \frac{\varphi_3}{2}.$$

Объясните, почему.

б) Имеется электронный полупроводник с концентрацией электронов n , докажите, что выполняется условие

$$\varphi_F = \varphi_C - \frac{\varphi_3}{2} + \varphi_T \ln \frac{n_i}{p}.$$

Обоснуйте полученные результаты.

Задача 2

Образец кремния находится в состоянии термодинамического равновесия и содержит донорные примеси с концентрацией $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Найдите температуру, при которой $p = 0,1n$. Покажите, что эта температура превышает 50 К.

Задача 3

а) Получите зависимость диффузионного потенциала в переходе от температуры. Обоснуйте полученный результат.

б) Используя полученное в пункте а) выражение, рассчитайте зависимость диффузионного потенциала в диапазоне температур от -30 до 70 °С. Расчет сделайте в относительных единицах. Постройте график и сделайте выводы.

Задача 4

Имеются германиевый и кремниевый диоды. Зависимость теплового тока от температуры определяется выражением

$$I_0(T) = I_{00} e^{-\varphi_3 / \varphi_T},$$

где I_{00} – ток, не зависящий от температуры.

а) Докажите, что относительное изменение теплового тока определяется выражением

$$\frac{I_0(T)}{I_0(T_0)} = e^{\frac{\Phi_3\left(\frac{T}{T_0}-1\right)}{\Phi_T\left(\frac{T}{T_0}\right)}},$$

где $I_0(T_0)$ – тепловой ток при $T = 300$ К.

б) Рассчитайте относительные изменения теплового тока при изменении температуры от -50 до 100 °С для обоих диодов. Постройте графики и сделайте выводы.

Задача 5

Имеется кремниевый диод.

а) Докажите, что для тонкой базы выполняются условия

$$C_6 r_d = C_6 \frac{\Phi_T}{I}, \quad C_d r_d = \frac{w^2}{2D},$$

где C_6, C_d – барьерная и диффузионная емкости диода; r_d – дифференциальное сопротивление перехода.

б) Вычислите величину тока через переход, при котором выполняется условие $C_6 r_d = C_d r_d$. Примите $C_6 = 10$ пФ, $w_6 = 10^{-5}$ см.

в) Рассчитайте значения постоянной времени $C_6 r_d$ при изменении тока через диод $I = (10^{-3} - 10^{-1})$ А и постройте графики.

Объясните полученные результаты.

ВАРИАНТ 10

Задача 1

Имеются два полупроводниковых материала с собственными концентрациями носителей n_{i1} и n_{i2} и шириной запрещенных зон φ_{31} и φ_{32} , эффективные плотности состояний считайте равными $N_C = N_V$.

а) Докажите, что выполняется соотношение

$$\frac{n_{i1}}{n_{i2}} = \frac{N_C^2}{n_{i2}} e^{-\frac{\varphi_{3cp}}{\varphi_T}}, \text{ где } \varphi_{3cp} = \frac{\varphi_{31} + \varphi_{32}}{2}.$$

б) Докажите, что выполняется условие

$$n_{i1} = n_{i2} e^{\frac{\varphi_{32} - \varphi_{31}}{2\varphi_T}}.$$

Обоснуйте полученные результаты.

Задача 2

Имеется полупроводник p -типа.

Каким будет положение уровня Ферми относительно энергии акцепторного уровня при $T = 0$ и при некоторой температуре $T = T_{\max}$?

Обоснуйте свои выводы.

Задача 3

Имеется переход и выполняется условие $p \gg n$.

а) Докажите, что справедливо равенство $\Delta\varphi_0 = \varphi_{Fp} - \varphi_{Fn}$, где φ_{Fp} и φ_{Fn} – уровни Ферми в дырочном и электронном полупроводниках до образования перехода.

б) Получите формулу для максимального значения диффузионного потенциала в переходе для невырожденного полупроводника.

Объясните полученный результат.

в) Переход образован из полупроводников типа n и p , причем концентрации примесей соответствуют границам вырождения полупроводников. Объясните, какого типа получится переход и почему.

Задача 4

Имеем диоды, выполненные из полупроводниковых материалов германия и кремния.

а) Докажите, что выполняется соотношение $\frac{r_{д. Si}}{r_{д. Ge}} = e^{\frac{\varphi_{3. Si} - \varphi_{3. Ge}}{\varphi_T}}$,

где $r_{д. Si}$; $r_{д. Ge}$ – дифференциальные сопротивления переходов. Доказательство провести для условий, что составляющие тепловых токов и внешние напряжения, приложенные к диодам, одинаковые.

б) Рассчитайте температурную зависимость отношения дифференциальных сопротивлений пункта а) при изменении температуры от -40 до 80 °С.

Задача 5

Имеется диод, изготовленный из полупроводникового материала германия.

а) Докажите, что для толстой базы выполняются условия $C_{\bar{6}} r_{\bar{д}} = C_{\bar{6}} \frac{\varphi_T}{I}$, $C_{\bar{д}} r_{\bar{д}} = \tau$, где $C_{\bar{6}}, C_{\bar{д}}$ – барьерная и диффузионная емкости диода; $r_{\bar{д}}$ – дифференциальное сопротивление перехода.

б) Вычислите величину тока через переход, при котором выполняется условие $C_{\bar{6}} r_{\bar{д}} = C_{\bar{д}} r_{\bar{д}}$. Примите $C_{\bar{6}} = 23$ пФ, $w_{\bar{6}} = 10^{-5}$ см.

в) Рассчитайте значения постоянной времени $C_{\bar{6}} r_{\bar{д}}$ при изменении тока через диод $I = (10^{-3} - 10^{-1})$ А и постройте графики.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

4.1 Методические указания по выполнению лабораторной работы № 1

Первая лабораторная работа должна закрепить изученный материал по теории биполярных и полевых транзисторов.

Транзисторы являются универсальными приборами, способными выполнять функции практически любого электронного элемента – резистора, диода, емкости, индуктивности.

Однако основное отличие транзисторов от пассивных электронных элементов – это усиление мощности. Мощность сигнала на выходе транзистора по отношению к мощности входного сигнала может быть во много раз больше. Усиление мощности может происходить за счет усиления на выходе тока, напряжения или обоих одновременно.

При изучении биполярных транзисторов обратите особое внимание на анализ зонных диаграмм, которые очень наглядно объясняют основные физические процессы в транзисторах.

Изучите основные режимы работы биполярных транзисторов, обратив основное внимание на активный режим работы как основной при работе с аналоговым сигналом. На рис. 4.1 приведены зонные диаграммы для транзистора $p-n-p$ при включении с общей базой для активного режима.

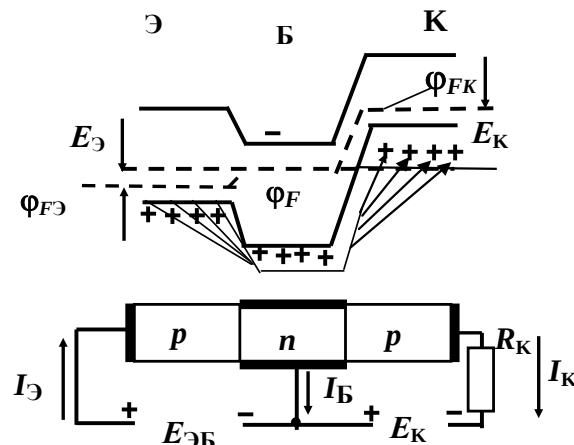


Рис. 4.1

Анализируя зонные диаграммы транзистора можно сделать следующие выводы.

1. Концентрация основных носителей в полупроводниках *p*-типа выше, чем в полупроводнике *n*-типа, это приводит к образованию резких переходов. Подумайте, из каких соображений сделано такое заключение.

2. Источник напряжения, включенный между эмиттером и базой, снижает потенциальный барьер эмиттерного перехода, что приводит к инжекции дырок из эмиттера в базу. Для дырок базы коллекторный переход не создает потенциальный барьер, и дырки свободно переходят в коллектор. Перешедшие в коллектор дырки и образуют коллекторный ток. Конечно, некоторое число дырок рекомбинирует в базе и ток коллектора меньше эмиттерного.

3. Протекание тока в цепи коллектора создает падение напряжения, и потенциальный барьер коллекторного перехода понижается, что приводит к инжекции дырок из коллектора в базу и снижению коллекторного тока. Для исключения инжекции со стороны коллектора потенциальный барьер повышают включением внешнего источника между базой и коллектором.

4. Увеличение тока эмиттера будет приводить к увеличению тока коллектора и падению напряжения на коллекторном резисторе. При падении напряжения на резисторе, равном напряжению коллекторного источника, величина потенциального барьера коллекторного перехода понизится и станет возможным инжекция дырок со стороны коллектора. Дальнейшее увеличение тока эмиттера не будет приводить к увеличению тока коллектора. Транзистор перейдет в режим насыщения.

Помните, что при активном режиме работы транзистора эмиттерный переход должен быть смещен в прямом направлении, а коллекторный переход – в обратном. При смещении обоих переходов в прямом направлении имеет место режим двойной инжекции, при этом инжектированные носители направлены навстречу друг другу и результирующий ток на выходе транзистора будет стремиться к нулю.

Внимательно проанализируйте коэффициент передачи тока эмиттера α , помня, что он является функцией коэффициентов инжекции и переноса.

Высокочастотные свойства транзистора зависят от наличия реактивных элементов транзистора.

Основными реактивными элементами являются барьерные емкости переходов и диффузионные емкости, обусловленные инжекцией носителей в базу.

В активном режиме, как правило, диффузионной емкостью коллекторного перехода можно пренебречь, так как отсутствует режим инжекции со стороны коллектора.

Строго говоря, понятие «диффузионная емкость» является условным, так как физически этой емкости нет.

Диффузионная емкость характеризует инерционность процесса распределения в базе инжектированных эмиттером носителей.

Рассматривая схемы включения биполярных транзисторов, обратите внимание на принципиальные различия в параметрах и характеристиках.

Помните, что статические вольт-амперные характеристики очень широко используются при расчетах и анализе электронных схем.

Рассмотрим пример использования статических вольт-амперных характеристик для расчета усилительного каскада при включении транзистора по схеме с ОЭ.

Схема усилительного каскада приведена на рис. 4.2.

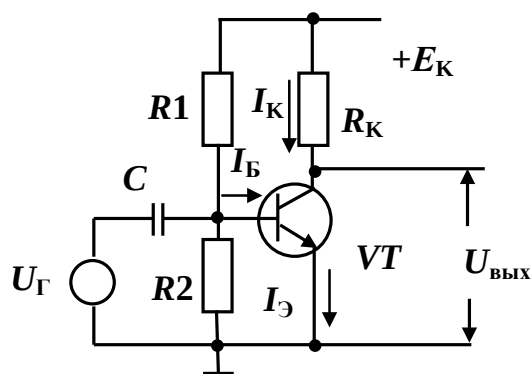


Рис. 4.2

Рассмотрим назначение элементов схемы.

Резистор R_K является элементом нагрузки; делителем, состоящим из резисторов $R1$ и $R2$, задается постоянный ток базы (смещение на базе); C – разделительная емкость, которая не позволяет

постоянному току протекать через генератор входного гармонического сигнала U_{Γ} , транзистор VT – основной элемент схемы, который и обеспечивает усиление мощности входного сигнала.

Из вышесказанного следует, что ток базы имеет переменную и постоянную составляющие: $I_B = I_{B.\text{пост}} + I_{B.\text{пер}}$.

Построим семейство выходных статических вольт-амперных характеристик транзистора и проведем нагрузочную прямую R_K (рис. 4.3).

1. Строим семейство выходных статических вольт-амперных характеристик транзистора (рис. 4.3, а).

2. Выбираем величину напряжения коллекторного питания E_K (рис. 4.3, б).

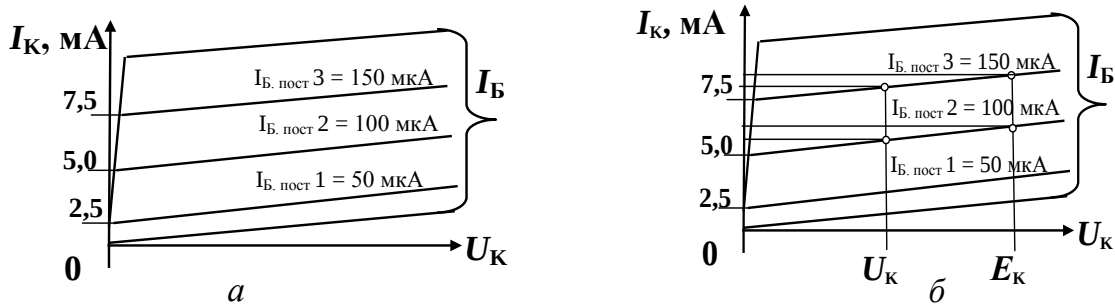


Рис. 4.3

3. Используя выходные статические вольт-амперные характеристики, вычислим величины интегрального и дифференциального коэффициентов передачи тока базы β при напряжениях на коллекторе транзистора U_K и E_K и токе базы 100 мкА.

Для напряжений U_K и E_K интегральные значения коэффициентов передачи соответственно равны:

$$\beta_{\text{инт}} = \frac{I_K}{I_{B.\text{пост}2}} = \frac{5,6 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 56;$$

$$\beta_{\text{инт}} = \frac{I_K}{I_{B.\text{пост}2}} = \frac{6,25 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 62,5.$$

Дифференциальный коэффициент передачи тока базы в нашем случае не зависит от напряжения коллекторного питания и равен

$$\beta_{\text{диф}} = \frac{\Delta I_{K1} - \Delta I_{K2}}{I_{\text{Б.пост}2} - I_{\text{Б.пост}3}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 50.$$

Из анализа полученных результатов следует вывод, что величина $\beta_{\text{диф}}$ не зависит от напряжения на коллекторе, а следовательно, любые приращения тока базы усиливаются в одинаковое число раз $\beta_{\text{диф}}$.

4. Строим нагрузочную характеристику (рис. 4.3, в).

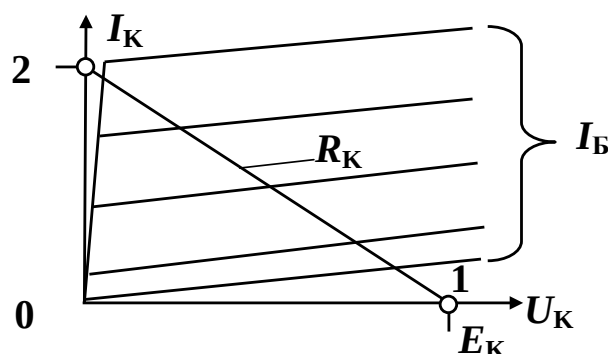


Рис. 4.3, в

Учитывая, что нагрузочная характеристика представляет статическую вольт-амперную характеристику резистора R_K , которая описывается законом Ома $I_{R_K} = \frac{U_{R_K}}{R_K}$, для построения нагрузочной характеристики достаточно найти две точки, через которые провести прямую.

Точка 1 получается при токе через резистор, равном нулю.

Точка 2 получена при падении напряжения на резисторе R_K , равном E_K .

5. Выбираем ток рабочей точки (ток покоя) (рис. 4.3, г).

Условия выбора рабочей точки.

а) Амплитуда выходного сигнала много меньше напряжения питания E_K .

В этом случае следует выбрать постоянную составляющую тока базы много меньше 100 мкА, что обеспечит малое потребление тока от источника коллекторного питания и небольшую рассеиваемую мощность на транзисторе.

б) Максимальная амплитуда выходного сигнала должна быть близка к половине напряжения источника коллекторного питания E_K .

В этом случае постоянная составляющая тока базы равна 100 мкА – точка 3 для используемого нами транзистора. При другом транзисторе ток базы окажется иным.

Из рис. 4.3, з следует, что половина напряжения E_K падает на транзисторе и половина – на резисторе R_K .

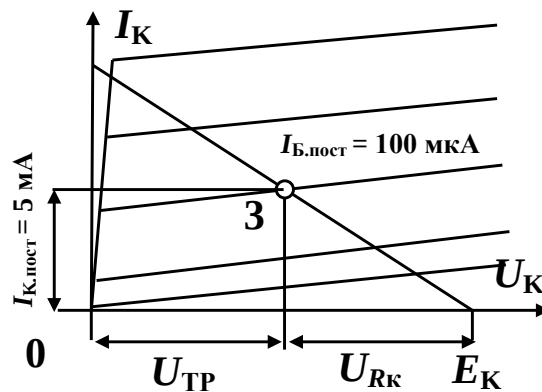


Рис. 4.3, з

6. На рис. 4.3, д показан принцип усиления сигнала с помощью биполярного транзистора.

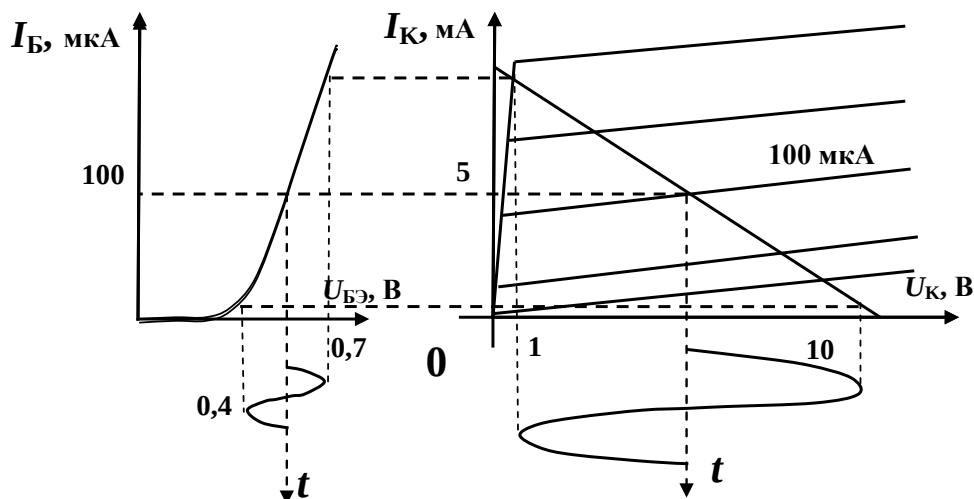


Рис. 4.3, д

Амплитуда входного сигнала равна 0,15 В, а выходного – 4,5 В.

Таким образом, коэффициент усиления усилителя по напряжению равен 30, а по току – 50. Коэффициент усиления по мощности равен 1500.

При изучении полевых транзисторов основное внимание следует обратить на физические принципы процессов, которые в принципе отличаются от процессов в биполярных транзисторах.

Полевые транзисторы при работе используют только один тип основных носителей в канале, при этом *n*-канальные транзисторы, например, из GaAs за счет высокой подвижности электронов материала канала обеспечивает существенно большее быстродействие, чем биполярные, использующие два типа носителей одновременно.

Кроме того, отсутствие инжекции исключает режим накопления и рассасывания носителей, что увеличивает быстродействие полевых транзисторов.

Обратите внимание, что в полевых транзисторах с управляющим *p-n*-переходом при работе транзистора в активном режиме переход всегда должен быть смещен в обратном направлении.

При изучении полевых транзисторов с изолированным затвором обратите внимание на процессы, происходящие в диэлектрике.

Отличие полевых транзисторов со встроенным и индуцированным каналами в основном конструктивное, что приводит к принципиальному отличию передаточных характеристик.

Полевые транзисторы имеют большую величину входного сопротивления на постоянном токе, что выгодно отличает их от биполярных транзисторов.

В результате большой величины входного сопротивления входная вольт-амперная характеристика оказывается неинформативной и при анализе полевых транзисторов не используется.

Для анализа полевых транзисторов используют выходные и передаточные вольт-амперные характеристики.

Передаточная характеристика отражает зависимость выходного тока от напряжения на затворе.

На рис. 4.4 приведены передаточная и выходные вольт-амперные характеристики полевого транзистора со встроенным n -каналом.

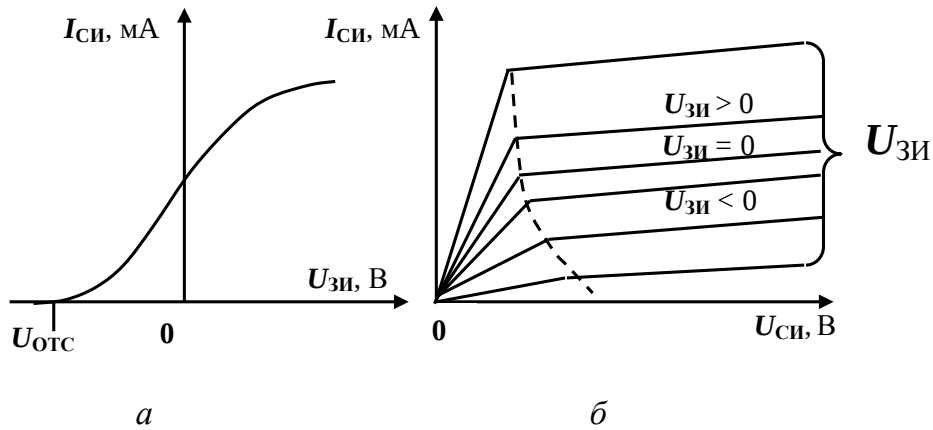


Рис. 4.4

Выходные статические вольт-амперные характеристики биполярных и полевых транзисторов внешне очень похожи, но имеют принципиальное отличие, обусловленное физическими процессами.

Варьируемым параметром у биполярных транзисторов является входной ток, а у полевых – напряжение на затворе.

Другое существенное отличие выходных статических вольт-амперных характеристик полевого транзистора заключается в том, что величина напряжения на стоке, при котором ток стока практически не зависит от напряжения, значительно больше, чем в биполярном транзисторе.

В полевых транзисторах это напряжение достигает 3–5 В, а в биполярных – 0,2–0,7 В для транзисторов малой мощности.

Это отличие позволяет использовать полевые транзисторы как переменные резисторы, управляемые напряжением.

На рис. 4.5 приведены передаточные характеристики трех типов полевых транзисторов.

Все передаточные характеристики относятся к полевым транзисторам с n -каналом.

Характеристика на рис. 4.5, *а* относится к полевому транзистору со встроенным каналом, который работает как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения. Характеристика на рис. 4.5, *б*

соответствует транзистору с индуцированным или наведенным каналом, который работает только в режиме обогащения, а характеристика на рис. 4.5, в характеризует работу полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, который всегда должен быть смещен в обратном направлении.

Для полевых транзисторов с каналом p -типа передаточные характеристики имеют вид зеркального отображения относительно оси токов стока.

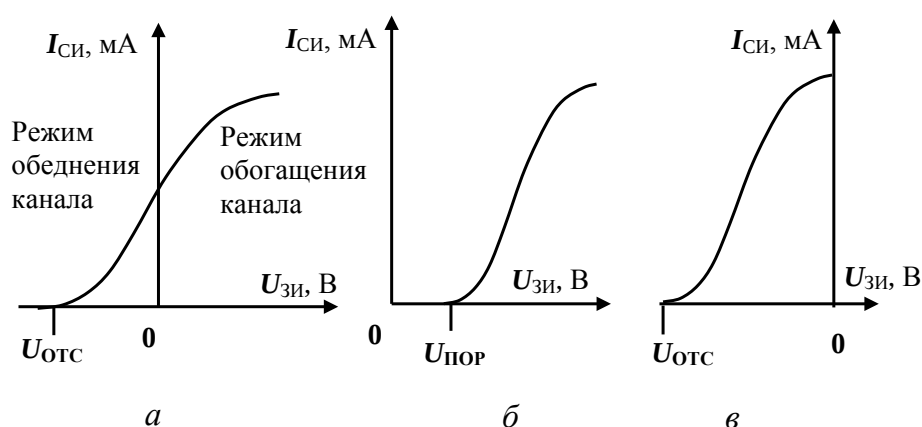


Рис. 4.5

4.2 Задания для лабораторной работы № 1

ВАРИАНТ 1

Задача 1

Начертите зонные диаграммы для транзистора n - p - n :

- для режима термодинамического равновесия;
- для активного режима;
- для инверсного режима.

Сравните диаграммы и сделайте выводы.

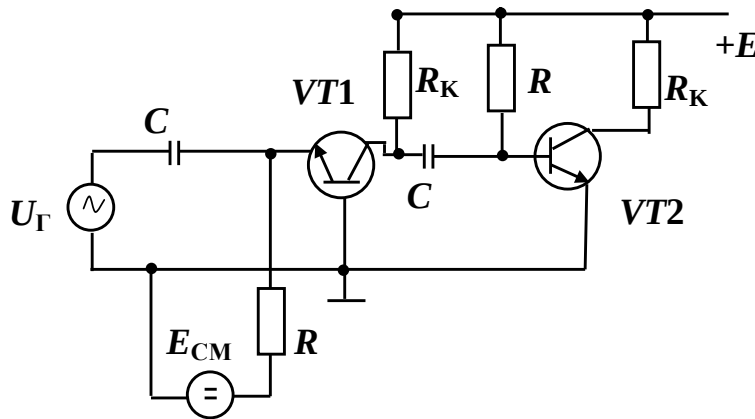
Задача 2

Имеются два транзистора с одинаковыми параметрами и емкостями коллекторного перехода. Один транзистор включен по схеме с ОБ, а второй – по схеме с ОЭ. На входе действует идеальный генератор напряжения $U_{Г}$.

Докажите, что при выполнении условий $r_K(1-\alpha) \gg r_6$, $r_K(1-\alpha) \gg r_3$ эквивалентное сопротивление в цепи коллектора первого каскада равно

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_K [r_6 + r_3(1+\beta)]}{R_K + r_6 + r_3(1+\beta)} \approx \frac{R_K r_3}{r_3 + R_K(1-\alpha)}.$$

Сделайте соответствующие выводы.



Задача 3

Имеется полевой транзистор из кремния с n -каналом и управляющим p - n -переходом.

Рассчитайте ширину канала при изменении напряжения на затворе $U_3 = -(0,5-10)\text{В}$; $a = 2\text{ мкм}$; $\rho = 4\text{ Ом}\cdot\text{см}$. Постройте графики и сделайте выводы.

Задача 4

Транзистор включен по схеме с ОБ.

а) Докажите, что напряжение база – эмиттер при выполнении условия $r_K \rightarrow \infty$ определяется следующим выражением:

$$U_{\text{БЭ}} = \varphi_T \ln \frac{I_3}{I_{30}^1} + r_6(1-\alpha)I_3.$$

б) Рассчитайте величину $U_{\text{БЭ}}$ при изменениях тока:

$$I_3 = (1-20)\text{мА}, \quad I_{30}^1 = 10^{-3}\text{мА}, \quad r_6 = 10\text{ Ом}, \quad \alpha = 0,98.$$

ВАРИАНТ 2

Задача 1

Имеется транзистор $p-n-p$.

а) Рассчитайте входные статические вольт-амперные характеристики для схемы с ОБ при различных напряжениях на коллекторе:

$$U_K = (0,5, 2, 4, 8) \text{ В}, I_{\Xi 0}^1 = 10 \text{ мкА}, \alpha_N = 0,9.$$

б) Рассчитайте входные статические вольт-амперные характеристики для схемы с ОБ при напряжении на коллекторе 2 В и изменении температуры от -50 до 100 °С. $I_{\Xi 0}^1 = 10 \text{ мкА}, \alpha_N = 0,9$.

Задача 2

Имеется усилитель на транзисторе $p-n-p$ включенном по схеме с ОБ.

а) Докажите, что коэффициент усиления по напряжению определяется выражением

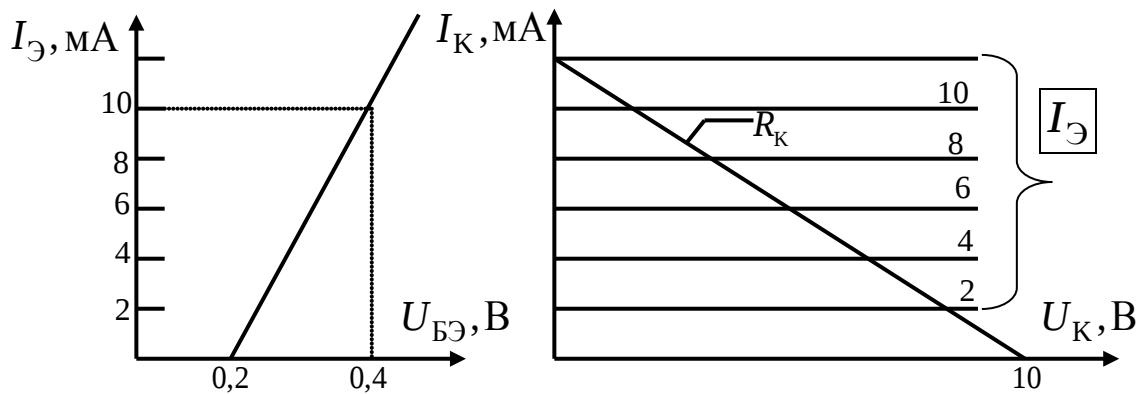
$$K_{UOB} = \frac{R_K \alpha I_{\Xi 0}^1 \left(e^{\frac{U_{\Xi}}{\varphi_T}} - 1 \right)}{\varphi_T + r_{\bar{\delta}} (1 - \alpha) \left(e^{\frac{U_{\Xi}}{\varphi_T}} - 1 \right) I_{\Xi 0}^1}, r_K \gg R_K.$$

б) Рассчитайте коэффициент усиления усилителя по напряжению при следующих параметрах:

$R_K = 1 \text{ кОм}, \alpha = 0,9, I_{\Xi 0}^1 = 10 \text{ мкА}, r_{\bar{\delta}} = 100 \text{ Ом}$ при изменении $U_{\Xi} = 2\varphi_T - 30\varphi_t$. Постройте график и сделайте выводы.

Задача 3

Имеем усилитель на транзисторе, включенном по схеме с ОБ, входные и выходные статические вольт-амперные характеристики приведены на рисунке. На выходных характеристиках проведена нагрузочная прямая. Напряжение коллекторного источника питания $E_K = 10 \text{ В}, \alpha = 0,95$.



- Проставьте значения коллекторного тока.
- Вычислите сопротивление коллекторного резистора.
- Подайте на вход гармонический сигнал и графически продемонстрируйте принцип усиления входного сигнала.

Задача 4

Имеется полевой транзистор из германия с p -каналом и управляющим p - n -переходом.

Рассчитайте ширину канала при изменении напряжения на затворе $U_3 = (0,5 - 10)$ В; $a = 1,4$ мкм; $\rho = 2$ Ом·см. Постройте графики.

ВАРИАНТ 3

Задача 1

Начертите зонные диаграммы для транзистора p - n - p :

- для режима термодинамического равновесия;
- для активного режима;
- для инверсного режима.

Сравните диаграммы и сделайте выводы.

Задача 2

Имеется усилитель на транзисторе n - p - n , включенном по схеме с ОЭ.

- Докажите, что коэффициент усиления по напряжению в области низких частот определяется выражением

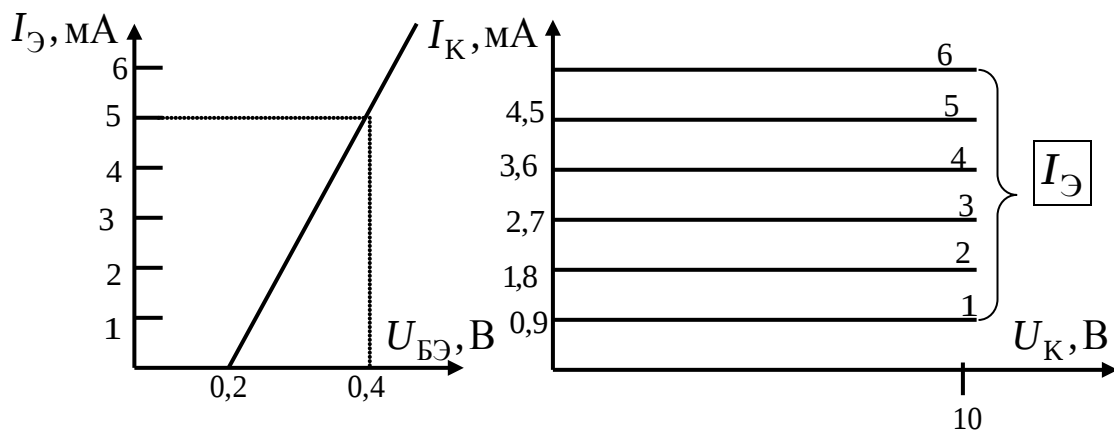
$$K_{U0} = \frac{R_K \beta \left(e^{U_{\text{Э}}/\varphi_T} - 1 \right) I_{\text{Э}0}^1}{\varphi_T (1 + \beta) + r_{\text{б}} \left(e^{U_{\text{Э}}/\varphi_T} - 1 \right) I_{\text{Э}0}^1}$$

при выполнении условия $r_K \gg R_K$.

б) Рассчитайте коэффициент усиления по напряжению при $R_K = 1$ кОм; $\alpha = 0,9$; $I_{\text{Э}0}^1 = 10$ мкА; $r_{\text{б}} = 100$ Ом при изменении $U_{\text{Э}} = 2\varphi_T - 30\varphi_T$. Постройте график и объясните полученные результаты.

Задача 3

Имеем усилитель на транзисторе, включенном по схеме с ОБ, входные и выходные статические вольт-амперные характеристики приведены на рисунке. Напряжение коллекторного источника питания $E_K = 10$ В.



а) Вычислите коэффициент передачи тока эмиттера α .

б) Вычислите сопротивление резистора в цепи коллектора и постройте нагрузочную характеристику, если известно, что падение напряжения на нем при токе коллектора $I_K = 2,7$ мА равно 5,4 В.

в) Подайте на вход гармонический сигнал и графически продемонстрируйте принцип усиления входного сигнала.

Задача 4

Имеется полевой транзистор из кремния с n -каналом и управляющим p - n -переходом.

Нарисуйте эквивалентную схему транзистора и подробно обоснуйте физическую природу всех элементов.

ВАРИАНТ 4

Задача 1

Имеется транзистор n - p - n .

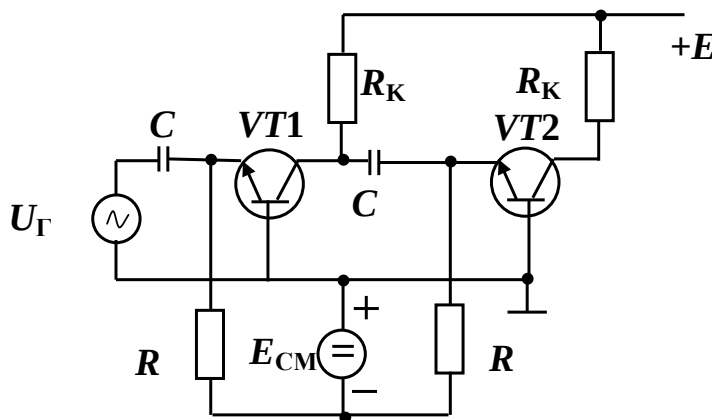
а) Рассчитайте входные статические вольт-амперные характеристики для схемы с ОБ при изменении напряжения на коллекторе:

$$U_K = (0,5, 2, 4, 8) \text{ В}; I_{\Sigma 0}^1 = 7 \text{ мкА}; \alpha_N = 0,9.$$

б) Рассчитайте входные статические вольт-амперные характеристики транзистора при его включении по схеме с ОБ и напряжении на коллекторе 2 В в диапазоне изменения температуры от -50 до 100 °С. $I_{\Sigma 0} = 5 \text{ мкА}$, $\alpha_N = 0,9$. Объясните полученные результаты.

Задача 2

Имеем двухкаскадный усилитель, в котором транзисторы включены по схеме с ОБ. На входе включен идеальный генератор напряжения. Принципиальная схема усилителя приведена на рисунке.



а) Докажите, что отношение коэффициента усиления по напряжению в двухкаскадном усилителе к коэффициенту усиления первого каскада при отключенном втором каскаде определяется выражением

$$A = \frac{K_{U1,2OB}}{K_{U1OB}} = \frac{\alpha R_K}{R_K + r_{\Xi} + r_{\bar{6}}(1 - \alpha)} \approx \alpha,$$

где $K_{U1,2OB}$, K_{U1OB} – общий коэффициент усиления по напряжению двухкаскадного усилителя и коэффициент усиления по напряжению первого каскада соответственно.

б) Рассчитайте коэффициент A при изменении коэффициента усиления $K_{U1OB} = 1 - 30$; $\alpha = 0,9$. Постройте графики и сделайте выводы о целесообразности двухкаскадного усилителя по схеме с ОБ.

Задача 3

Транзистор включен по схеме с ОЭ.

а) Докажите, что выполняется следующее равенство:

$$U_{БЭ} = \varphi_T \ln \frac{I_B(1 + \beta)}{I_{\Xi 0}^1} + r_{\bar{6}} I_B, \text{ если влиянием коллекторного}$$

напряжения пренебречь.

б) Рассчитайте величину $U_{БЭ}$ при изменениях тока базы $I_B = (10 - 100) \text{ мкА}$, $I_{\Xi 0}^1 = 210^{-6} \text{ А}$, $r_{\bar{6}} = 50 \text{ Ом}$, $\beta = 50$.

Задача 4

Имеется полевой транзистор из кремния с n -каналом и управляющим p - n -переходом.

а) Начертите сток-затворные (передаточные) и выходные вольт-амперные характеристики. Подробно объясните с физических позиций вид этих характеристик.

б) По имеющимся характеристикам вычислите значение крутизны на линейном участке передаточной характеристики и выходное сопротивление в зависимости от напряжения $U_{СИ}$.

ВАРИАНТ 5

Задача 1

Имеется кремниевый транзистор, $n-p-n$, включенный по схеме с ОБ.

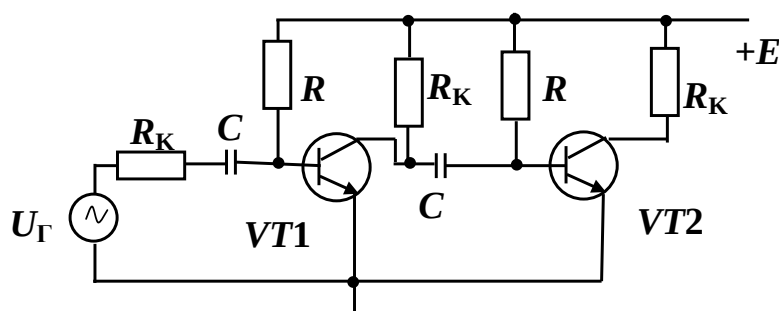
а) Докажите, что при $I_K = 0$ справедливо равенство

$$U_K = \varphi_T \left[\ln \frac{\alpha_N I_{\Xi 0}^1}{I_{K0}^1} \left(e^{U_{\Xi} / \varphi_T} - 1 \right) + 1 \right].$$

б) Положив в равенстве пункта а) $\alpha_N = 0,95$; $I_{\Xi 0}^1 = 0,2 I_{K0}^1$, рассчитайте напряжение на коллекторе при $I_K = 0$ и изменениях на эмиттере $U_{\Xi} = 2\varphi_T - 10\varphi_T$.

Задача 2

Имеем двухкаскадный усилитель, в котором транзисторы включены по схеме с ОЭ. Принципиальная схема усилителя приведена на рисунке.



а) Докажите, что отношение коэффициента усиления по напряжению двухкаскадного усилителя к коэффициенту усиления первого каскада равно $A = \frac{K_{U1,2OЭ}}{K_{U1OЭ}} = \frac{K_{U1OЭ}}{\frac{K_{U1OЭ}}{\beta} + 1}$, где $K_{U1,2OЭ}$

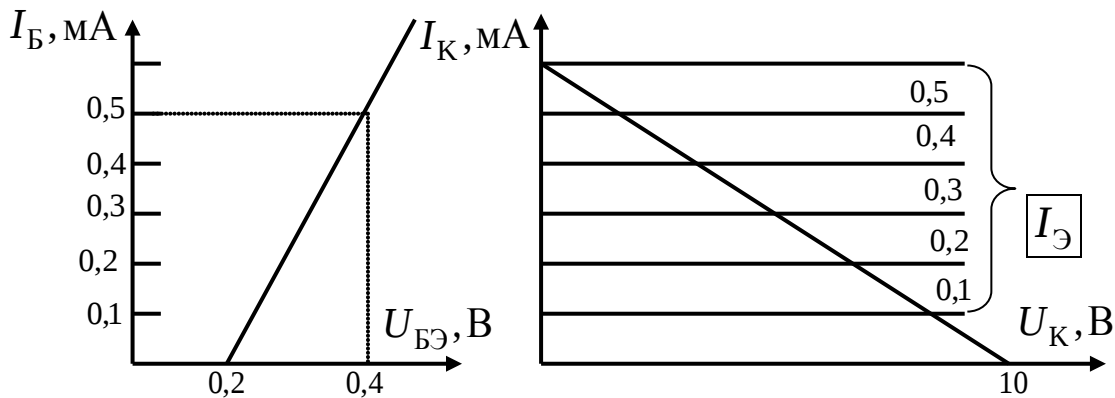
– коэффициент усиления двухкаскадного усилителя; $K_{U1OЭ}$ – коэффициент усиления однокаскадного усилителя.

б) Рассчитайте коэффициент A при изменениях $K_{U1OЭ} = 5-50$, $\beta = 50$. Постройте графики и сделайте выводы.

Задача 3

Имеем усилитель на транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, входные и выходные статические вольт-амперные характеристики приведены на рисунке. На выходных характеристиках построена нагрузочная характеристика. Напряжение коллекторного источника питания $E_K = 10 \text{ В}$, $\beta = 20$.

- Проставьте значения коллекторного тока.
- Вычислите сопротивление коллекторного резистора.
- Подайте на вход гармонический сигнал и графически продемонстрируйте принцип усиления входного сигнала.



Задача 4

Имеется усилительный каскад на полевом транзисторе МДП со встроенным каналом типа n и резистором, включенном в цепи стока R_C . Транзистор включен по схеме с ОИ.

- Начертите принципиальную схему каскада. Укажите на схеме токи, протекающие через транзистор.
- Запишите коэффициент усиления каскада по напряжению. Считайте, что сопротивление в цепи истока равно нулю.
- Запишите значение напряжения на стоке при значениях

$$I_C = 5 \text{ mA}; R_K = 5 \text{ кОм}; E_C = 30 \text{ В}.$$

ВАРИАНТ 6

Задача 1

Имеется германиевый транзистор $p-n-p$.

а) Постройте выходные статические вольт-амперные характеристики для схемы с ОБ:

$$\alpha_N = 0,9; I_{K0}^1 = 10^{-5} \text{ A}; \alpha_i = 0,1; I_{Э0}^1 = 10^{-6} \text{ A}.$$

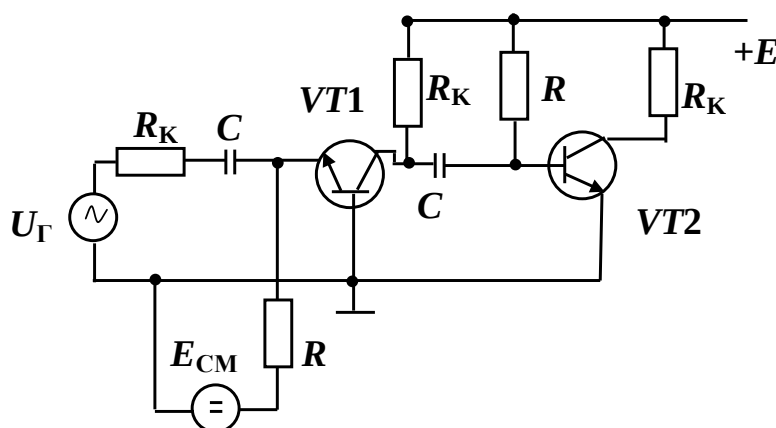
б) Повторите пункт а) для

$$\alpha_N = 0,95; I_{K0}^1 = 10^{-6} \text{ A}; I_{Э0}^1 = 10^{-7} \text{ A}; \alpha_i = 0,2.$$

Объясните различия в выходных характеристиках транзистора.

Задача 2

Имеем двухкаскадный усилитель, в котором первый транзистор включен по схеме с ОБ, а второй – по схеме с ОЭ.



а) Докажите, что отношение коэффициента усиления по напряжению двухкаскадного усилителя к коэффициенту усиления по напряжению первого каскада при отключенном втором каскаде определяется выражением

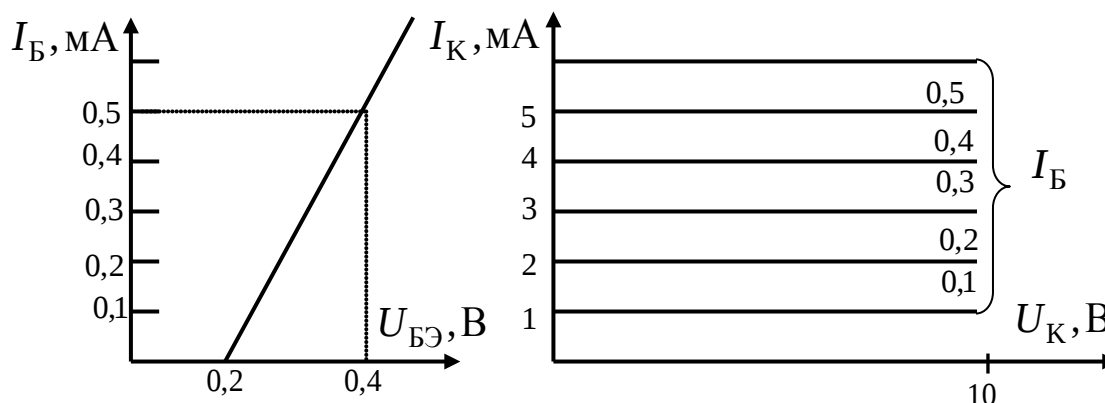
$$A = \frac{K_{U1,2}}{K_{U1OB}} = \frac{\beta R_K}{R_K + r_6 + r_3(1 + \beta)} < \beta, \text{ где } K_{U1,2} - \text{коэффициент}$$

усиления двухкаскадного усилителя; $K_{U2OЭ}$ – коэффициент усиления однокаскадного усилителя.

б) Рассчитайте коэффициент A при изменениях $\beta = 5-50$, $R_K = 1 \text{ кОм}$, $r_{\delta} = 100 \text{ Ом}$, $I_{\mathcal{O}} = 2 \text{ мА}$. Постройте графики и сделайте выводы.

Задача 3

Имеем усилитель на транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, входные и выходные статические вольт-амперные характеристики приведены на рисунке. Напряжение коллекторного источника питания $E_K = 10 \text{ В}$.



а) Рассчитайте коэффициент передачи тока базы транзистора, используя статические вольт-амперные характеристики.

б) Постройте нагрузочную характеристику, если известно, что при токе коллектора 3 мА на резисторе R_K падение напряжения равно 5,1 В.

Задача 4

Имеется усилительный каскад на полевом транзисторе МОП с индуцированным каналом типа n и резистором, включенном в цепи стока R_C . Транзистор включен по схеме с ОИ.

а) Начертите принципиальную схему каскада. Обеспечьте активный режим. Укажите на схеме токи, протекающие через транзистор.

б) Начертите передаточную и выходную статические вольт-амперные характеристики. Графическим методом покажите возможность усиления сигнала по напряжению.

в) Запишите значение напряжения на стоке при значениях

$$I_C = 4 \text{ мА}; R_C = 3 \text{ кОм}; E_C = 20 \text{ В}.$$

ВАРИАНТ 7

Задача 1

Имеется транзистор $n-p-n$.

а) Докажите, что коэффициент внутренней обратной связи для схемы с ОБ определяется выражением

$$\mu_{ЭК} = \frac{dU_{Э}}{dU_{К}} = \frac{e^{U_{К}/\varphi_T}}{\frac{I_{Э}}{I_{Э0}^1} + 1 + \alpha_N \left(e^{U_{К}/\varphi_T} - 1 \right)}.$$

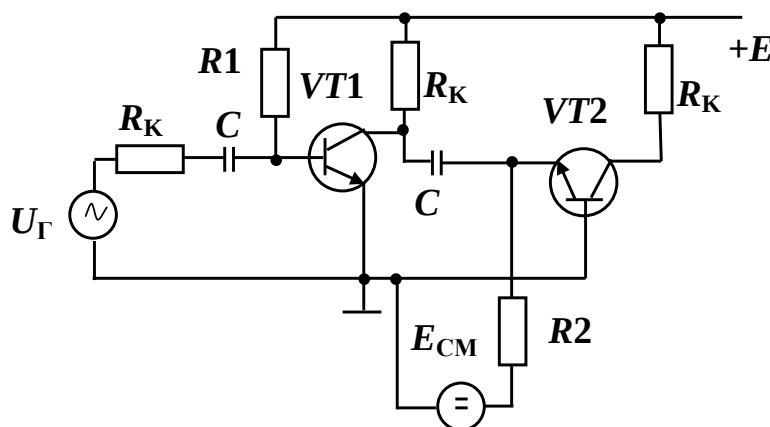
б) Рассчитайте коэффициент внутренней обратной связи при работе транзистора в активном режиме при

$$I_{Э} = (1-10) \text{ мА}; \quad U_{К} = 5 \text{ В}; \quad I_{Э0}^1 = 10 \text{ мкА}; \quad \alpha_N = 0,9.$$

По результатам расчета постройте график.

Задача 2

Имеем двухкаскадный усилитель, в котором первый транзистор включен по схеме с ОЭ, а второй – по схеме ОБ. Принципиальная схема усилителя приведена на рисунке.



а) Докажите, что отношение коэффициента усиления по напряжению двухкаскадного усилителя к коэффициенту усиления второго каскада определяется выражением

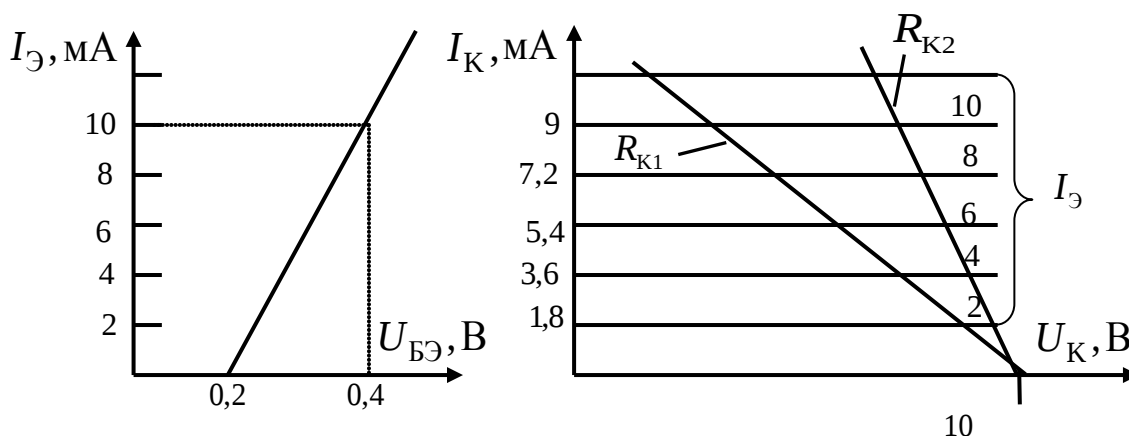
$$A = \frac{K_{U1,2}}{K_{U2OЭ}} = \frac{\beta R_K}{r_6 + (R_K + r_Э(1 + \beta))} < \alpha, \text{ где } K_{U1,2} - \text{коэффициент}$$

усиления двухкаскадного усилителя; $K_{U1OЭ}$ – коэффициент усиления второго каскада.

б) Рассчитайте коэффициент A при изменениях $\beta = 10\text{--}80$, $R_K = 0,5 \text{ кОм}$, $r_6 = 25 \text{ Ом}$, $I_Э = 2,5 \text{ мА}$. Постройте графики и сделайте выводы.

Задача 3

Имеем усилительный каскад. Транзистор включен по схеме с ОБ. Входные и выходные статические вольт-амперные характеристики приведены на рисунке. На выходных характеристиках проведены две нагрузочные прямые.



а) Докажите, что для приведенных на рисунке выходных вольт-амперных характеристик интегральный и дифференциальный коэффициенты передачи тока эмиттера равны между собой. Вычислите их значения. Объясните, в каких случаях это выполняется.

б) Вычислите значения сопротивлений резисторов R_{K1} и R_{K2} .

в) Подайте на вход гармонический сигнал и графически покажите, что коэффициент усиления по напряжению пропорционален сопротивлению резистора в цепи коллектора.

Задача 4

Имеется усилительный каскад на полевом транзисторе МДП со встроенным каналом типа p и резистором, включенном в цепи стока R_C . Транзистор включен по схеме с ОИ.

а) Начертите принципиальную схему каскада. Укажите на схеме токи, протекающие через транзистор.

б) Запишите коэффициент усиления каскада по напряжению. Считайте, что сопротивление в цепи истока равно нулю.

в) Запишите значение напряжения на стоке при значениях

$$I_C = 7 \text{ мА}; R_C = 2 \text{ кОм}; E_C = 20 \text{ В}.$$

ВАРИАНТ 8

Задача 1

Имеется транзистор $n-p-n$.

а) Докажите, что дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода определяется выражением

$$r_d = \frac{dU_{\text{Э}}}{dI_{\text{Э}}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{Э0}}} \frac{1}{1 + \alpha_i \frac{I_{\text{К0}}^1}{I_{\text{Э}}} \left(e^{U_{\text{К}}/\varphi_T} - 1 \right)}.$$

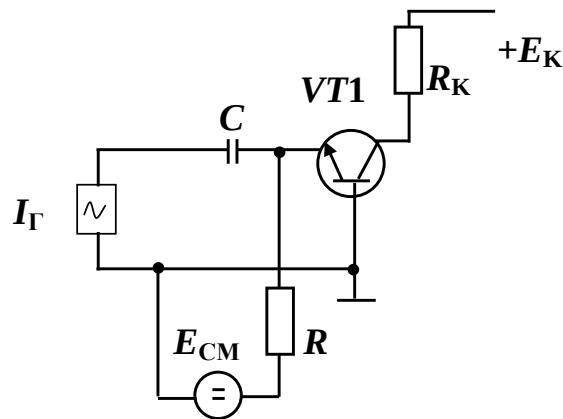
б) Получите выражение для дифференциального сопротивления эмиттерного перехода при выполнении условий $U_{\text{К}} < 0$, $|U_{\text{К}}| \gg \varphi_T$.

в) При каких допущениях справедливо равенство

$$r_d = \frac{\varphi_T}{I_{\text{К0}}^1 + I_{\text{Э}}}$$

Задача 2

Имеется однокаскадный усилитель на транзисторе $n-p-n$. На входе действует идеальный генератор тока $I_{\text{вх}}$. Принципиальная схема каскада приведена на рисунке.

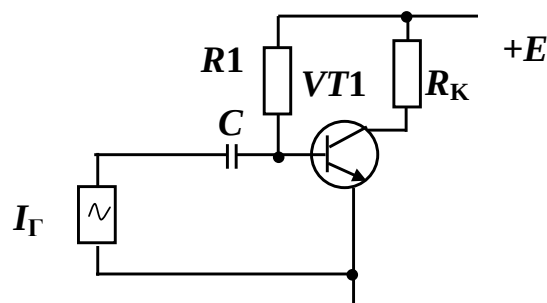


а) Докажите, что величина коллекторного тока при включении транзистора по схеме с ОБ определяется выражением

$$I_{\text{К.ОБ}} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{\text{вх}}.$$

б) Докажите, что величина коллекторного тока при включении транзистора по схеме с ОЭ, принципиальная схема которого приведена на рисунке, определяется выражением

$$I_{\text{К.ОЭ}} = \beta I_{\text{вх}}.$$

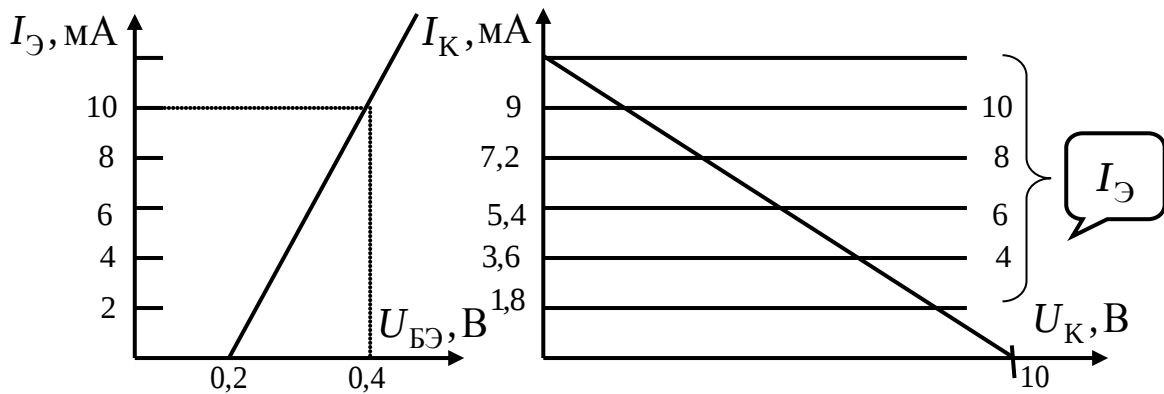


в) Используя пункт а) и б), рассчитайте отношение

$$\frac{I_{\text{К.ОЭ}}}{I_{\text{К.ОБ}}} = 1 + \beta, \quad \beta = 2 - 50.$$

Задача 3

Имеем усилительный каскад. Транзистор включен по схеме с ОБ. Входные и выходные статические вольт-амперные характеристики приведены на рисунке.



а) Проведите нагрузочные характеристики для двух значений сопротивлений в коллекторной цепи R_{K1} и R_{K2} , если известно: при токе $I_K = 5$ мА. напряжение на коллекторе транзистора $U_K = 5$ В. Падения напряжений на резисторах при этом токе равны $U_{R_{K1}} = 5,4$ В; $U_{R_{K2}} = 2,7$ В.

б) Запишите, чему равны напряжения коллекторного источника питания.

Задача 4

Имеется усилительный каскад на полевом транзисторе МДП со встроенным каналом типа p и резистором, включенном в цепи стока R_C . Транзистор включен по схеме с ОИ.

а) Начертите принципиальную схему каскада. Укажите на схеме токи, протекающие через транзистор.

б) Начертите передаточную и выходную статические вольт-амперные характеристики. Графическим методом покажите возможность усиления сигнала по напряжению.

в) Запишите значение напряжения на стоке при

$$I_C = 2 \text{ мА}; R_C = 6 \text{ кОм}; E_C = 24 \text{ В}.$$

ВАРИАНТ 9

Задача 1

Имеется транзистор $p-n-p$, который включен по схеме с ОЭ.

а) Рассчитайте выходные статические вольт-амперные характеристики при

$$I_B = (0,01 - 0,1) \text{ мА}; \alpha = 0,95; I_{K0}^1 = 10^{-3} \text{ мА}; r_K = 2 \text{ мОм}.$$

Постройте графики и сделайте необходимые выводы.

б) Докажите справедливость равенства

$$U_{\text{бэ}} = \varphi_T \ln \left[\frac{I_B (1 + \beta)}{I_{\text{эо}}^1} + 1 + \alpha \left(e^{U_K / \varphi_T} - 1 \right) \right].$$

в) По формуле п. б) рассчитайте и постройте графики $U_{\text{бэ}} = f(I_B)$ при

$$U_K < 0; \quad |U_K| = \varphi_T \div 20\varphi_T.$$

Задача 2

Имеем однокаскадный усилитель, на входе которого действует идеальный генератор тока $I_{\text{вх}}$. Примите $r_K \rightarrow \infty$.

а) Докажите, что коэффициенты усиления по напряжению при включениях транзисторов по схеме с ОБ и ОЭ определяются выражением

$$K_{\text{УОБ}} = K_{\text{УОЭ}} = \frac{R_K \beta}{r_{\text{э}} (1 + \beta) + r_{\text{б}}}.$$

б) Докажите, что отношение выходных напряжений для схем включения транзистора с ОЭ и ОБ определяется выражением

$$\frac{U_{\text{вых.ОЭ}}}{U_{\text{вых.ОБ}}} = 1 + \beta.$$

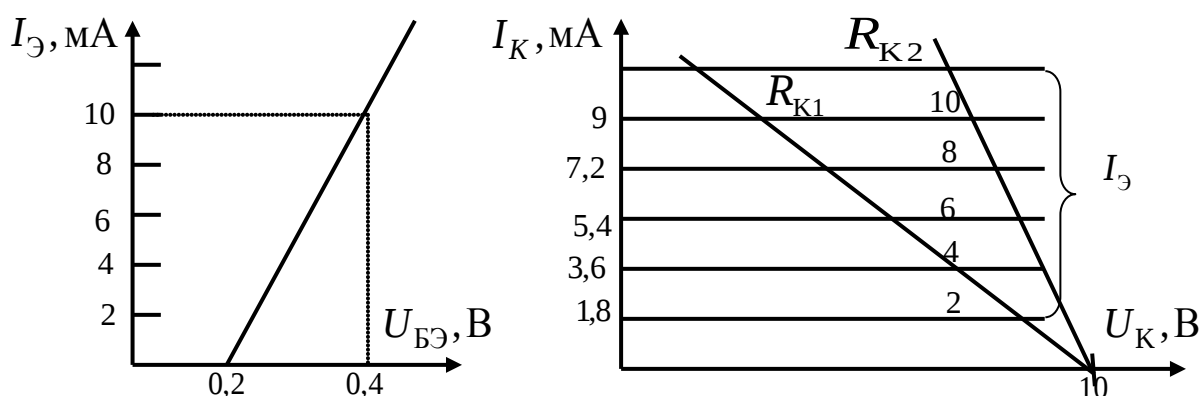
Задача 3

Имеем усилительный каскад. Транзистор включен по схеме с ОБ. Входные и выходные статические вольт-амперные характеристики приведены на рисунке. На выходных характеристиках проведены две нагрузочные прямые.

а) Докажите, что в данном случае интегральный и дифференциальный коэффициенты передачи тока эмиттера равны между собой. Вычислите их значения. Объясните, в каких случаях это выполняется.

б) Вычислите значения сопротивлений резисторов R_{K1} и R_{K2} .

в) Подайте на вход гармонический сигнал и графически покажите, что коэффициент усиления по напряжению пропорционален сопротивлению резистора в цепи коллектора.



Задача 4

Имеется усилительный каскад на полевом транзисторе МОП с индуцированным каналом типа p и резистором, включенном в цепи стока R_C . Транзистор включен по схеме с ОИ.

а) Начертите принципиальную схему каскада. Обеспечьте активный режим. Укажите на схеме токи, протекающие через транзистор.

б) Начертите передаточную и выходную статические вольт-амперные характеристики. Графическим методом покажите возможность усиления сигнала по напряжению.

в) Запишите значение напряжения на стоке при

$$I_C = 2 \text{ мА}; R_C = 6 \text{ кОм}; E_C = 24 \text{ В}.$$

ВАРИАНТ 10

Задача 1

Начертите зонные диаграммы для транзистора $p-n-p$:

- а) для режима термодинамического равновесия;
- б) для активного режима;
- в) для инверсного режима.

Сравните диаграммы и сделайте выводы.

Задача 2

Имеются германиевый и кремниевый диоды.

- а) Докажите справедливость выражения

$$l/l_0 = \sqrt{1 - \frac{U}{\phi_{Fp} - \phi_{Fn}}}, \text{ где } l - \text{ ширина перехода; } l_0 - \text{ ширина}$$

перехода в равновесном состоянии; ϕ_{Fp}, ϕ_{Fn} – уровни Ферми в примесных полупроводниках до образования перехода.

- б) Постройте график относительного изменения ширины перехода в диодах при изменении напряжения (обратное смещение)

$$\phi_{Fp} - \phi_{Fn} = \frac{\phi_3}{2}; \frac{\phi_3}{1,5}; \phi_3. \text{ Сделайте выводы.}$$

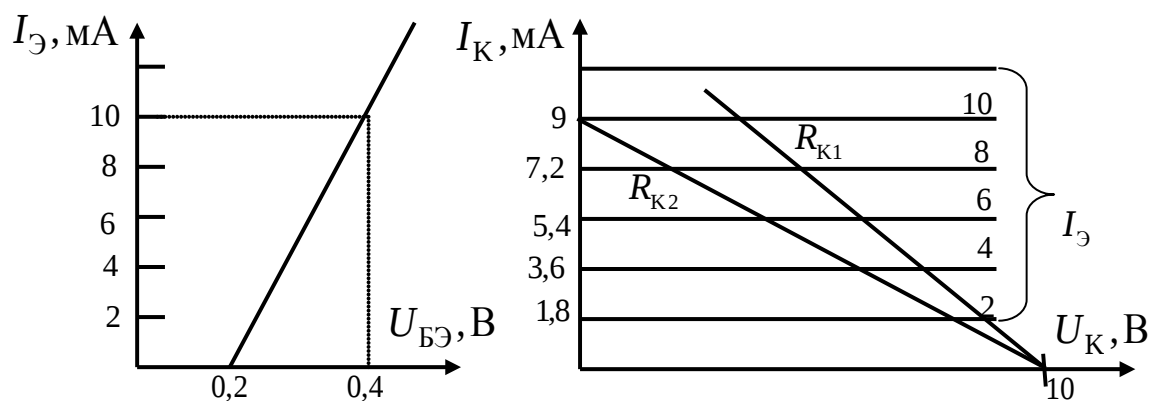
Задача 3

Имеем усилительный каскад. Транзистор включен по схеме с ОБ. Входные и выходные статические вольт-амперные характеристики приведены на рисунке. На выходных характеристиках проведены две нагрузочные прямые.

- а) Докажите, что в данном случае интегральный и дифференциальный коэффициенты передачи тока эмиттера равны между собой. Вычислите их значения. Объясните, в каких случаях это выполняется.

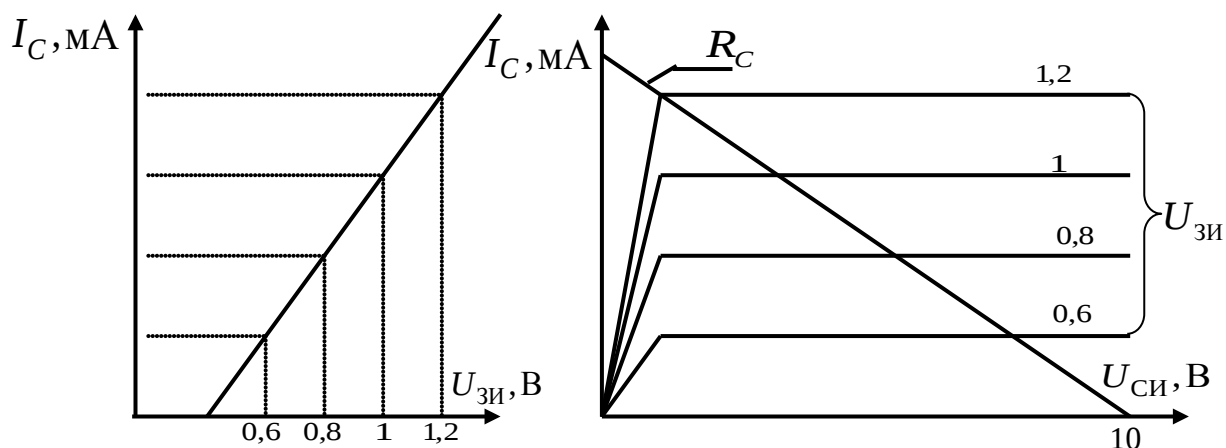
- б) Вычислите значения сопротивлений резисторов R_{K1} и R_{K2} .

- в) Подайте на вход гармонический сигнал и графически покажите, что коэффициент усиления по напряжению пропорционален сопротивлению резистора в цепи коллектора.



Задача 4

Имеется усилительный каскад на полевом транзисторе МОП. Передаточная и выходные статические вольт-амперные характеристики с нагрузочной прямой приведены на рисунке.



- Какой тип канала имеет транзистор, обоснуйте, почему?
- На статических вольт-амперных характеристиках проставьте значения токов I_C , если $S = 5 \text{ mA/V}$.
- Объясните, почему при небольших напряжениях на стоке ток стока зависит от этого напряжения.
- Вычислите сопротивление резистора R_C .
- Проставьте значения напряжений на выходной вольт-амперной характеристике, если $U_{ЗИ.отс} = 0.4$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

5.1 Методические указания по выполнению лабораторной работы № 2

Лабораторная работа № 2 состоит из трех задач.

Первая задача позволяет закрепить материал, относящийся к анализу переходных процессов в транзисторных ключах. Транзисторные ключи являются основой всех логических элементов, а следовательно, основой цифровой техники. Знания переходных процессов и методов их сокращения позволяет выбрать оптимальное схемное решение для построения интегральных схем с точки зрения их максимального быстродействия.

Обратите внимание на то, что транзисторные ключи могут применяться и для сокращения длительности фронтов входного сигнала или формирования импульсов почти прямоугольной формы из гармонического входного сигнала.

Необходимо помнить, что сокращение одной стадии переходного процесса, например сокращение длительности положительного фронта, в насыщенном транзисторном ключе на биполярном транзисторе при увеличении тока базы приводит к увеличению накопления избыточных носителей в базе. При закрывании транзистора увеличивается время рассасывания, и суммарное время переходного процесса может даже увеличиться.

Вторая задача относится к технологии изготовления интегральных микросхем, и для её решения требуются знания практически всех основных операций при изготовлении интегральных схем. Перед выполнением задачи подробно изучите основные технологические операции, обращая основное внимание на их назначение и физические процессы, которые при этом происходят. Обратите особое внимание на современные технологии изготовления интегральных схем.

Для решения третьей задачи прежде всего необходимы знания всего курса электроники и базовых логических элементов.

Базовыми элементами считаются схемы, которые являются основой интегральных схем массового производства.

Для ТТЛ-технологии базовыми элементами следует считать схемы, приведенные на рис. 8.13, МЭСЛ – рис. 8.17, МДП – рис. 9.1 и КМОП – рис. 9.2 учебного пособия В. М. Ицковича.

Необходимо помнить, что объяснять принцип действия разработанного Вами устройства требуется на уровне принципиальной, а не функциональной схемы. Все переключения, которые происходят в схеме после подачи входного сигнала (логический ноль или логическая единица), должны быть доказаны на основе физических процессов, происходящих в активных элементах.

ПРИМЕР 1

Необходимо разработать принципиальную схему базового логического элемента НЕ для интегральной МОП-технологии. На физическом уровне обосновать его работу.

Принципиальная схема элемента приведена на рис. 5.1

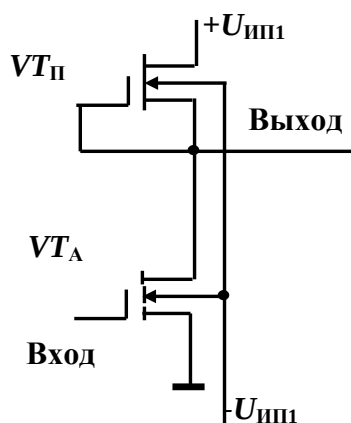


Рис. 5.1

В качестве активного транзистора VT_A выбран полевой транзистор с индуцированным каналом типа n . Применение полевого транзистора с индуцированным каналом позволяет упростить технологию, так как уменьшает количество операций при его изготовлении и повышает помехозащищенность логического элемента. Второе утверждение будет доказано ниже.

В качестве резистора в цепи истока включен полевой транзистор со встроенным каналом n -типа $VT_{П}$, пассивный. Применение транзистора вместо резистора обусловлено двумя причинами.

Первая – упрощение технологии, а вторая состоит в том, что полевой транзистор занимает меньшую площадь, чем интегральный резистор. При анализе считаем, что входной сигнал поступает от аналогичного устройства и статическая нагрузка равна бесконечности. Для пояснения работы схемы рассмотрим передаточные статические вольт-амперные характеристики (рис. 5.2).

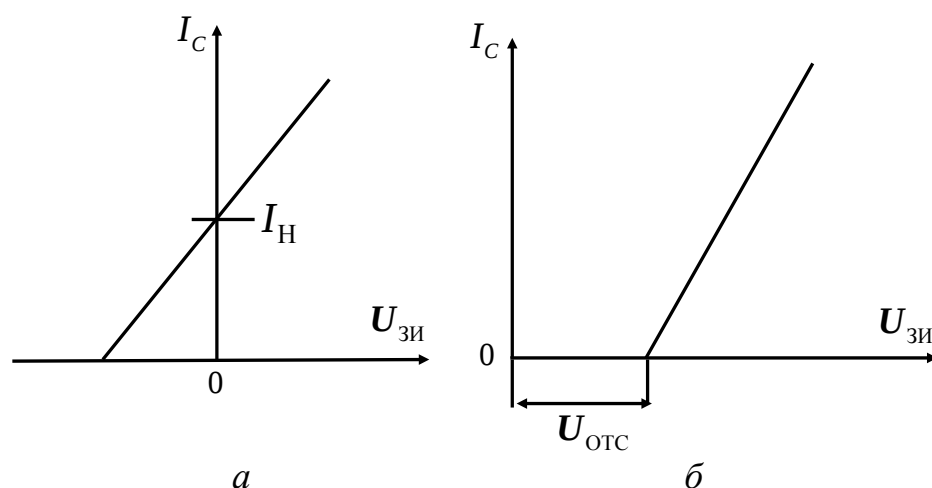


Рис. 5.2

Пассивный транзистор со встроенным каналом может работать в режимах обеднения и обогащения. Передаточная характеристика приведена на рис. 5.2, а. Учитывая, что напряжение затвор-исток равно нулю, так как затвор и исток соединены между собой, сопротивление канала при изменениях напряжения на затворе активного транзистора остается постоянным. На рис. 5.2, б приведена передаточная характеристика активного транзистора VT_A .

Если на входе активного транзистора логический ноль (напряжение низкого уровня), канал в нем отсутствует, и сопротивление между истоком и стоком можно считать равным бесконечности. Это следует из передаточной характеристики транзистора, которая приведена на рис. 5.2, а. Ток через транзисторы не протекает, напряжение на выходе равно напряжению источника питания, т. е. на выходе логическая единица.

При подаче на вход активного транзистора напряжения высокого уровня $U_{П1} > U_{отс}$ индуцируется канал и сопротивление между истоком и стоком резко падает. Если сопротивление канала активного транзистора много меньше сопротивления канала

пассивного транзистора, через транзисторы протекает ток I_H , напряжение на выходе равно логическому нулю.

$U_{\text{вых}}^0 = U_{\Pi} \frac{r_{\text{кан.акт}}}{r_{\text{кан.акт}} + r_{\text{кан.пас}}}$. Если выполняется условие

$r_{\text{кан.пас}} \gg r_{\text{кан.акт}}$, то $U_{\text{вых}}^0 \approx 0$.

Высокая помехозащищенность обусловлена видом передаточной характеристики. Пока напряжение помехи меньше напряжения отсечки (больше), переключение не происходит.

Максимальная помехозащищенность имеет место при выполнении условия $U_{\text{отс}} = \frac{U_{\text{ипп}}}{2}$.

Обратите внимание на то, что в ТТЛ-логике базовый элемент выполняет логическую функцию И-НЕ, в МЭСЛ – ИЛИ-НЕ и ИЛИ, в МДП и КМОП – логическую функцию НЕ.

Необходимо помнить, логические элементы И и ИЛИ обладают свойствам двойственности, т. е., используя логические элементы НЕ и И, можно реализовать логическую схему ИЛИ и наоборот.

ПРИМЕР 2

Имея базовый элемент И с двумя входами реализуем логическую схему ИЛИ.

На рис. 5.3 приведена функциональная схема элемента ИЛИ.

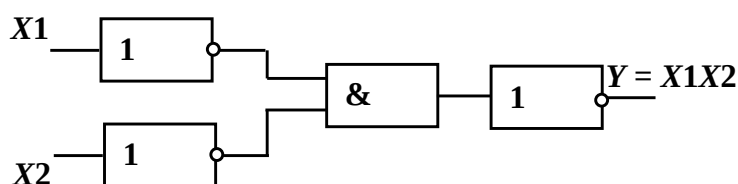


Рис. 5.3

Для доказательства, что предложенная схема реализует логическую функцию ИЛИ, используем переключательную таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Переключательная таблица

X_1	X_2	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_1\bar{X}_2$	$\overline{\bar{X}_1\bar{X}_2}$
0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1
1	1	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1

Из анализа переключательной таблицы следует, что приведенная на рис. 5.3 функциональная схема реализует логическую функцию ИЛИ.

На рис. 5.4 приведена принципиальная схема логического элемента ИЛИ с использованием базового элемента ТТЛ.

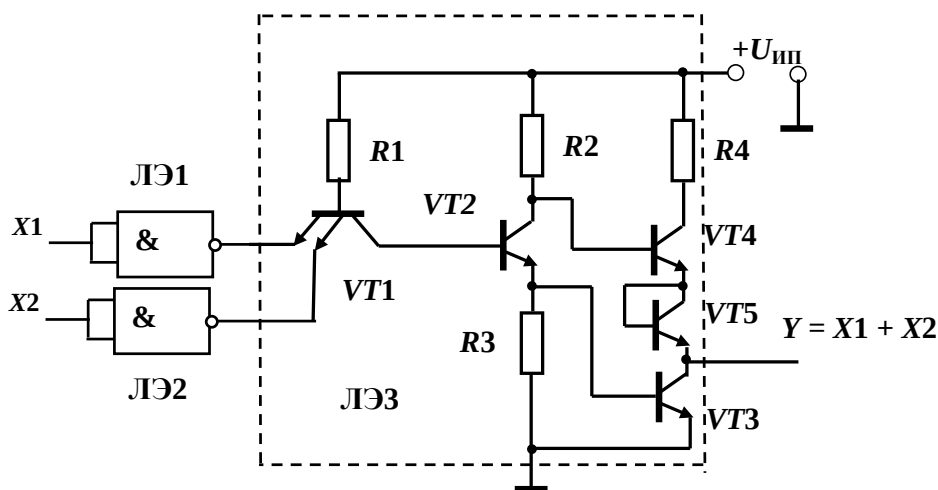


Рис. 5.4

Все логические элементы одного типа. Используя логический элемент ЛЭ3, необходимо на физическом уровне объяснить работу базового логического элемента ТТЛ.

5.2 Задания для лабораторной работы № 2

ВАРИАНТ 1

Задача 1

Имеется насыщенный ключ на биполярном транзисторе.

а) Начертите принципиальную электрическую схему насыщенного ключа и объясните его работу.

б) Докажите, что длительность положительного фронта определяется выражением $t_{\Phi}^{+} = \tau_{\beta} \ln \frac{I_{\bar{6}}}{I_{\bar{6}} - 0,9I_{\bar{6}H}}$. Ёмкостью коллекторного перехода пренебречь.

в) Постройте график изменения длительности положительного фронта от тока

$$I_{\bar{6}} = (0,3 - 1,2) \text{ мА}; I_{\bar{6}H} = 0,2 \text{ мА}; \tau_{\beta} = 10^{-6} \text{ с.}$$

Задача 2

Опишите подробно технологическую операцию эпитаксии при изготовлении интегральных микросхем, свойства и назначение этой операции.

Задача 3

Используя базовые элементы ТТЛ, реализуйте логическую функцию $y = x_1 + x_2 x_3 + x_4$. Начертите принципиальную схему. На физическом уровне обоснуйте её работу.

ВАРИАНТ 2

Задача 1

Имеется насыщенный ключ на биполярном транзисторе.

а) Начертите принципиальную электрическую схему насыщенного ключа и объясните его работу.

б) Докажите, что длительность положительного фронта определяется выражением

$$t_{\Phi}^{+} = \tau_{\beta} \ln \frac{I_{\bar{6}}}{I_{\bar{6}} - 0,9 \frac{E_K}{\beta R_K}}.$$

Ёмкостью коллекторного перехода пренебречь.

в) Рассчитайте и постройте график длительности положительного фронта при изменениях напряжения коллекторного питания $E_K = (1-15) \text{ мА}$; $I_{\bar{c}} = 1 \text{ мА}$; $\beta = 20$; $R_K = 10^3 \text{ Ом}$; $\tau_{\beta} = 0,5 \text{ мс}$.

Задача 2

Опишите технологическую операцию получения структур Si-SiO₂-Si, свойства и назначение этих структур в технологии изготовления интегральных микросхем.

Задача 3

Используя базовые элементы ТТЛ, реализуйте логическую функцию $y = x_1 + x_2 + x_3$. Начертите принципиальную схему. На физическом уровне обоснуйте её работу.

ВАРИАНТ 3

Задача 1

Имеется насыщенный ключ на биполярном транзисторе.

а) Начертите принципиальную электрическую схему насыщенного ключа и объясните его работу.

б) Докажите, что для времени рассасывания избыточных носителей у коллекторного перехода справедливо выражение

$$t_{\text{рас}} = \tau_{\beta i} \ln \frac{\Delta I_{\bar{c}}}{\Delta I_{\bar{c}} - I_{\bar{c}} + I_{\text{бн}}}.$$

Ёмкостью коллекторного перехода пренебречь.

в) Рассчитайте время рассасывания избыточного заряда у коллекторного перехода при изменениях тока $\Delta I_{\bar{c}} = (1-10) \text{ мА}$.

$$I_{\bar{c}} = 1 \text{ мА}; I_{\text{бн}} = 0,2 \text{ мА}; \tau_{\beta i} = 10^{-7} \text{ с}.$$

Постройте графики и сделайте выводы.

Задача 2

Опишите технологию изготовления интегрального транзистора. Укажите принципиальные отличия транзистора, изготовленного по интегральной технологии, от дискретного транзистора.

Задача 3

Используя базовые логические элементы ЭМСЛ, реализуйте логическую функцию $y = x_1 x_2 + x_3$. **Выход схемы должен иметь повышенную помехозащищенность.** Начертите принципиальную схему логического элемента и на физическом уровне объясните его работу.

ВАРИАНТ 4

Задача 1

Имеется насыщенный ключ на биполярном транзисторе.

а) Начертите принципиальную электрическую схему насыщенного ключа и объясните его работу.

б) Докажите, что для времени рассасывания избыточных носителей у коллекторного перехода справедливо выражение

$$t_{\text{рас}} = \tau_{\beta i} \ln \frac{I_{\text{б}} + E_{\text{см}} / R_{\text{см}}}{I_{\text{бН}} + E_{\text{см}} / R_{\text{см}}}.$$

Ёмкостью коллекторного перехода пренебречь.

в) Рассчитайте время рассасывания избыточного заряда у коллекторного перехода при изменении тока базы

$$I_{\text{б}} = (1-10) \text{ мА}; \quad I_{\text{бН}} = 0,2 \text{ мА}; \quad \tau_{\beta i} = 10^{-7} \text{ с}; \quad E_{\text{см}} / R_{\text{см}} = 0,2 \text{ мА}.$$

Постройте графики и сделайте выводы.

Задача 2

Опишите методы изоляции элементов схемы при интегральной технологии изготовления микросхем, достоинства и недостатки каждого метода.

Задача 3

Используя базовые двухвходовые элементы ТТЛ, разработайте логический элемент, реализующий функцию $y = x_1 x_2 + x_3$. Приведите принципиальную схему устройства и на физическом уровне объясните его работу.

ВАРИАНТ 5

Задача 1

Имеется насыщенный ключ на биполярном транзисторе.

а) Начертите принципиальную электрическую схему насыщенного ключа и объясните его работу.

б) Докажите, что для времени рассасывания избыточных носителей у коллекторного перехода справедливо выражение

$$t_{\text{pac}} = \tau_{\beta i} \ln \frac{U_{\Gamma}}{(R_{\text{с}} + r_{\text{с}}) \left[I_{\text{сн}} + \frac{E_{\text{см}}}{R_{\text{см}}} \right]}.$$

Емкость коллекторного напряжения примите равной нулю.

в) Рассчитайте время рассасывания избыточного заряда у коллекторного перехода при изменении напряжения генератора $U_{\Gamma} = (1-12)\text{В}$.

$$I_{\text{сн}} = 0,33 \text{ мА}; \quad \tau_{\beta i} = 10^{-7} \text{ с}; \quad R_{\text{с}} = 10^3 \text{ Ом}; \quad r_{\text{с}} = 100 \text{ Ом};$$

$$\frac{E_{\text{см}}}{R_{\text{см}}} = 0,12 \text{ мА}.$$

Постройте графики и сделайте выводы.

Задача 2

Опишите технологию изготовления интегрального транзистора с диодом Шоттки. Обоснуйте целесообразность применения диода Шоттки.

Задача 3

Используя базовый логический элемент МОП-логики, реализуйте логическую функцию $y = x_1 x_3 x_4 + x_2 x_5 x_6$. Начертите принципиальную схему устройства и на физическом уровне объясните его работу.

ВАРИАНТ 6

Задача 1

Имеется ключ с ускоряющей емкостью.

а) Начертите электрическую принципиальную схему ключа с ускоряющей емкостью и объясните ее работу.

б) Начертите эпюры переходного процесса в ключе с ускоряющей емкостью.

в) Запишите значения токов базы в момент включения на входе идеального перепада напряжения и в установившемся режиме.

г) Объясните, почему длительность отрицательного фронта в ключе с ускоряющей емкостью меньше, чем в насыщенном ключе.

Задача 2

Опишите технологию изготовления МЕР-транзистора. Объясните принцип его работы и основные достоинства. В чем отличия в работе МЕР-транзистора и биполярного транзистора?

Задача 3

Используя базовый логический элемент МОП-логики, реализуйте логическую функцию $y = x_1 x_2 x_3 + x_3 x_4 x_5$. Начертите принципиальную схему устройства и на физическом уровне объясните его работу.

ВАРИАНТ 7

Задача 1

Имеется насыщенный ключ на биполярном транзисторе.

а) Начертите электрическую принципиальную схему насыщенного ключа и объясните его работу.

б) Докажите, что длительность отрицательного фронта определяется выражением

$$t_{\Phi}^- = \tau_{\beta} \ln \frac{\Delta I_{\delta}}{\Delta I_{\delta} - 0,9 I_{\delta H}}.$$

Ёмкостью коллекторного перехода пренебречь.

в) Рассчитайте и постройте график изменения длительности отрицательного фронта от тока базы. Сделайте выводы.

$$\Delta I_{\bar{\sigma}} = (0,11 - 1,7) \text{ мА}; I_{\bar{\sigma}\text{Н}} = 0,25 \text{ мА}; \tau_{\beta} = 10^{-6} \text{ с}.$$

Задача 2

Приведите эквивалентную схему (модель) интегрального p - n - p -транзистора, сравните её с эквивалентной схемой дискретного p - n - p -транзистора и сделайте выводы.

Задача 3

Используя базовый логический элемент КМОП-логики, реализуйте логическую функцию $y = x_1 x_2 + x_1 x_3$. Начертите принципиальную схему устройства и на физическом уровне объясните его работу.

ВАРИАНТ 8

Задача 1

Имеется насыщенный ключ на биполярном транзисторе.

а) Начертите электрическую принципиальную схему насыщенного ключа и объясните его работу.

б) Докажите, что длительность отрицательного фронта определяется выражением

$$t_{\Phi}^{-} = \tau_{\beta} \ln \frac{\Delta I_{\bar{\sigma}} \beta}{\Delta I_{\bar{\sigma}} \beta - 0,9 \frac{E_{\text{К}}}{R_{\text{К}}}}.$$

Ёмкостью коллекторного перехода пренебречь.

в) Рассчитайте и постройте график изменения длительности отрицательного фронта при изменении напряжения на коллекторе

$$E_{\text{К}} = (1 - 10) \text{ В};$$

$$\Delta I_{\bar{\sigma}} = 0,5 \text{ мА}; \beta = 20; \tau_{\beta} = 0,510^{-6} \text{ с}; R_{\text{К}} = 10^3 \text{ Ом}.$$

Сделайте выводы.

Задача 2

Если не принять соответствующих мер, то при изготовлении контакта из алюминия с кремнием n -типа в коллекторной области n - p - n -транзистора образуется не омический контакт, а диод Шоттки. Поясните, почему это происходит и какую технологическую

операцию предварительно необходимо провести, чтобы на границе раздела $\text{Al} - \text{SiO}_2$ образовался омический контакт.

Задача 3

Используя базовый логический элемент КМОП-логики, реализуйте логическую функцию $y = x_1 + x_2 + x_3$. Начертите принципиальную схему устройства и на физическом уровне объясните его работу.

ВАРИАНТ 9

Задача 1

Имеется насыщенный ключ на биполярном транзисторе.

а) Начертите принципиальную электрическую схему насыщенного ключа и объясните его работу.

б) Докажите, что разность длительностей отрицательных фронтов при разных коллекторных токах насыщения определяется выражением

$$t_{\Phi 1}^- - t_{\Phi 2} = \tau_{\beta} \ln \frac{\Delta I_{\beta} \beta - 0,9 I_{\text{KH}2}}{\Delta I_{\beta} \beta - 0,9 I_{\text{KH}1}}.$$

в) Рассчитайте разность длительностей отрицательных фронтов при изменении тока коллектора насыщения

$$I_{\text{KH}1} = (2 - 15) \text{ мА};$$

$$\tau_{\beta} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}; \quad \Delta I_{\beta} = 0,5 \text{ мА}; \quad \beta = 50; \quad I_{\text{KH}2} = 2 \text{ мА}.$$

Постройте график и сделайте выводы.

Задача 2

На подложке выполнен транзистор $VT1$ типа $n-p-n$. Для межэлементной изоляции использован метод изоляции $p-n$ -переходом.

а) Объясните, почему образуется паразитный транзистор $VT2$ $p-n-p$ -типа.

б) Приведите принципиальную схему соединения этих транзисторов и поясните, на какие параметры основного транзистора влияет паразитный транзистор.

Задача 3

Используя базовый логический элемент КМОП-логики, реализуйте логическую функцию $y = x_1 x_2 x_3 x_4$. Начертите принципиальную схему устройства и на физическом уровне объясните его работу.

ВАРИАНТ 10

Задача 1

Имеется ключ с отрицательной нелинейной обратной связью. В цепь обратной связи включен диод Шоттки.

а) Приведите электрическую принципиальную схему ключа и объясните принцип работы.

б) Рассчитайте напряжение на коллекторе, при котором диод открыт. Падение напряжения на диоде при прямом смещении

$$U_{\text{д.пр}} = 0,2 \text{ В}; \quad U_{\text{БЭ}} = 0,5 \text{ В}.$$

в) Докажите, что в ключе с отрицательной нелинейной обратной связью можно существенно уменьшить все стадии переходного процесса.

г) Докажите, что в момент включения отрицательной обратной связи ток коллектора определяется выражением

$$I_{\text{К}} = \frac{E_{\text{К}} - U_{\text{БЭ}} - U_{\text{д.пр}}}{R_{\text{К}}}.$$

Задача 2

Опишите изопланарную технологию изоляции элементов друг от друга в интегральных микросхемах. Укажите её основные достоинства и недостатки.

Задача 3

Используя базовый логический элемент МОП-логики, реализуйте логическую функцию $y = x_1 x_2 + x_3 x_4$. Начертите принципиальную схему устройства и на физическом уровне объясните его работу.