

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

А.Д. Баринов
Б.Н. Мирошников
А.А. Афанасьев
К.С. Макарук

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум

по курсу
«Твердотельная электроника»

для студентов, обучающихся по направлению
«Электроника и нанoeлектроника»

Москва
Издательство МЭИ
2025

УДК 621.38

Б 249

Утверждено учебным управлением МЭИ

Подготовлено на кафедре электроники и наноэлектроники

Рецензенты: доктор технических наук, профессор А.И. Попов,

Б Твердотельная электроника : лабор. Практик. / А.Д. Баринов, Б.Н. Мирошников, А.А. Афанасьев, К.С. Макарук. – М. : Издательство МЭИ, 2025. – 53 с.

Представлены теоретические сведения и методика выполнения цикла лабораторных работ по исследованию электрических явлений в полупроводниковых приборах, методах исследования их характеристик.

Лабораторный практикум предназначен для обеспечения учебного процесса при многоуровневой подготовке специалистов по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», а также для образовательных программ технической и педагогической направленности.

© **Национальный исследовательский университет МЭИ, 2023**

Баринов Алексей Дмитриевич

Мирошников Борис Николаевич

Афанасьев Андрей Андреевич

Макарук Кристина Сергеевна

Практикум по курсу

«Твердотельная электроника»

для студентов, обучающихся по направлению

«Электроника и наноэлектроника»

Редактор издательства

Темплан издания МЭИ 2025, метод.

Подписано в печать

Печать офсетная

Формат 60×84/16 Физ. печ. л. 2,8 Тираж 200 экз. Изд. № Заказ

Оглавление

Лабораторная работа № 1. Исследование статических вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов	4
Лабораторная работа № 2. Исследование температурной зависимости статических вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов	16
Лабораторная работа № 3. Исследование статических характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой	21
Лабораторная работа № 4. Исследование статических характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером	31
Лабораторная работа № 5. Исследование статических характеристик полевого транзистора с управляющим рп-переходом	36
Лабораторная работа № 6. Исследование статических характеристик полевого транзистора с МДП – структурой	42
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА	49
Литература.....	53

Лабораторная работа № 1. Исследование статических вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов

Цель работы: изучение принципа работы полупроводниковых диодов и светодиодов.

Контролируемое введение примеси, **легирование**, позволяет управлять концентрацией свободных носителей заряда в полупроводнике. Если атомы примеси отдают электроны, примесь называется **донорной**. Уровень донорной примеси E_d находится в запрещенной зоне вблизи **дна зоны проводимости** E_c (рисунок 1.1). Для ионизации атомов примеси требуется энергия равная разности $(E_c - E_d)$. Для Si и Ge донорной примесью могут быть элементы пятой группы таблицы Д.И. Менделеева. Если же атомы примеси принимают электроны, примесь называется **акцепторной**. Уровень акцепторной примеси E_a находится в запрещенной зоне вблизи **потолка валентной зоны** E_v . Для ионизации атомов примеси требуется энергия равная разности $(E_a - E_v)$: Величина подвижности определяется температурой структуры полупроводникового *pn*-перехода. Для Si и Ge акцепторной примесью могут быть элементы третьей группы таблицы Д.И. Менделеева.

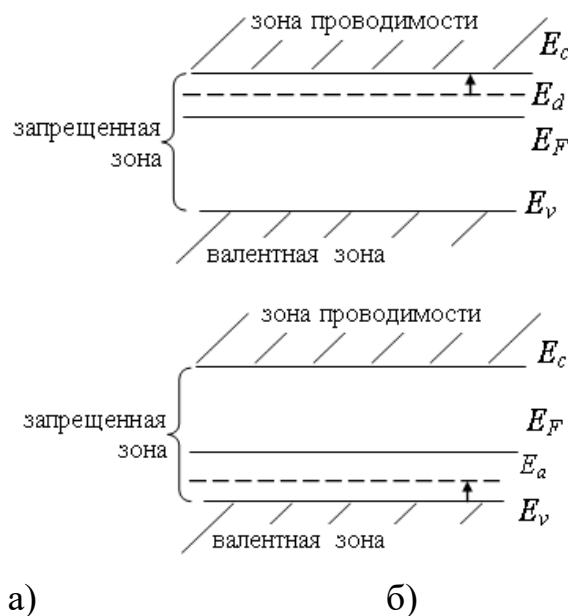


Рис. 1.1. Зонная структура полупроводника:

а) полупроводник *n*-типа (электронный); б) полупроводник *p*-типа (дырочный)

При температурах, близких к комнатной, концентрации **основных** носителей заряда совпадают с концентрацией легирующей примеси: $n_{n0} = N_d$, $p_{p0} = N_a$.

Произведение концентраций свободных электронов и дырок в полупроводнике равно квадрату собственной концентрации носителей заряда $N_d \cdot p_{n0} = N_a \cdot n_{p0} = n_i^2$. Из этого соотношения находят концентрацию

неосновных носителей заряда, т.е. дырок в полупроводнике n -типа (p_{n0}) и электронов в полупроводнике p -типа (n_{p0}).

Удельная электропроводность полупроводника σ ($\sigma = 1/\rho$, где ρ – удельное сопротивление) прямо пропорциональна концентрации свободных носителей заряда и их **подвижности** μ :

$$\sigma = q\mu_n N_d + q\mu_p N_a, \quad (1.1)$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд.

Величина подвижности определяется температурой структуры и концентрацией примеси, на которой рассеивается носитель заряда. Так, в случае рассмотрения движения электронов как **неосновных** носителей заряда в p -области, он может изменять свою траекторию (рассеиваться) только на ионах акцепторов (N_a), а дырки, двигающиеся в n -области, могут рассеиваться только на ионах доноров N_d . Поэтому для **неосновных** носителей заряда $\mu_n \equiv \mu_n(N_a)$ и $\mu_p \equiv \mu_p(N_d)$.

При расчёте электропроводности базовой области следует рассчитать концентрацию **основных** носителей заряда (например, в базовой n -области – это электроны), которые рассеиваются на ионах доноров N_d , а в базовой p -области дырки, будучи основными носителями заряда, рассеиваются на ионах акцепторов N_a . Поэтому величины подвижности носителей заряда будут **отличаться** от рассчитанных для **неосновных** носителей заряда при расчёте тока насыщения. Для **основных** носителей заряда $\mu_n \equiv \mu_n(N_d)$ и $\mu_p \equiv \mu_p(N_a)$.

Для расчета подвижности в германии может быть использована эмпирическая формула:

$$\mu(N, T) = \left[\mu_1 + \frac{\mu_2}{1 + (N / N_0)^a} \right] \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^b, \quad (1.2)$$

где $N = N_d$ или N_a – концентрации ионов доноров или акцепторов,

T_0 – комнатная температура (300 K),

остальные величины являются эмпирическими постоянными и приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Параметры подвижности для германия (Ge)

Носители заряда	μ_1	μ_2	$N_0, \text{см}^{-3}$	a	b
	$\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$				
Электроны	50	3850	$8,1\cdot 10^{16}$	0,48	$-1,6$ при $N \leq 10^{15}$ $0,269\cdot \ln(N) - 10,9$ при $10^{15} < N < 10^{20}$
Дырки	42	1860	$1,4\cdot 10^{17}$	0,42	$-2,3$ при $N \leq 10^{16}$ $0,33\cdot \ln(N) - 14,5$ при $10^{16} < N < 10^{21}$

Для расчета подвижности в кремнии (Si) и арсениде галлия (GaAs) следует использовать следующую также эмпирическую формулу:

$$\mu(N, T) = \mu_{\max} \cdot \frac{B(N)}{1 + B(N) \cdot (T / T_0)^{\alpha + \beta}} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\beta}, \quad (1.3)$$

где

$$B(N) = \frac{\mu_{\min} + \mu_{\max} \cdot (N_g / N)^{\gamma}}{\mu_{\max} - \mu_{\min}}. \quad (1.4)$$

Данные для расчета подвижности носителей заряда в кремнии и арсениде галлия сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Параметры подвижности для кремния (Si) и арсенида галлия (GaAs)

Тип п/п материала	Тип носителей заряда	$\mu_{\max}, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$\mu_{\min}, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$N_g, \text{см}^{-3}$	α	β	γ
Si	Электроны	1414,0	68,5	$9,2 \cdot 10^{16}$	2,42	0,26	0,71
	Дырки	470,5	44,9	$2,2 \cdot 10^{17}$	2,20	0,36	0,72
GaAs	Электроны	9400,0	750,0	$7 \cdot 10^{16}$	2,3	0,50	0,5
	Дырки	450,0	30,0	$5 \cdot 10^{17}$	2,3	0,45	0,5

Полупроводниковым диодом называют прибор с одним *pn*-переходом и двумя выводами. Структура диода на основе *pn*-перехода и его энергетическая диаграмма показаны на рисунке 1.2, *а*, условно-графическое обозначение – на рисунке 1.2, *б*.

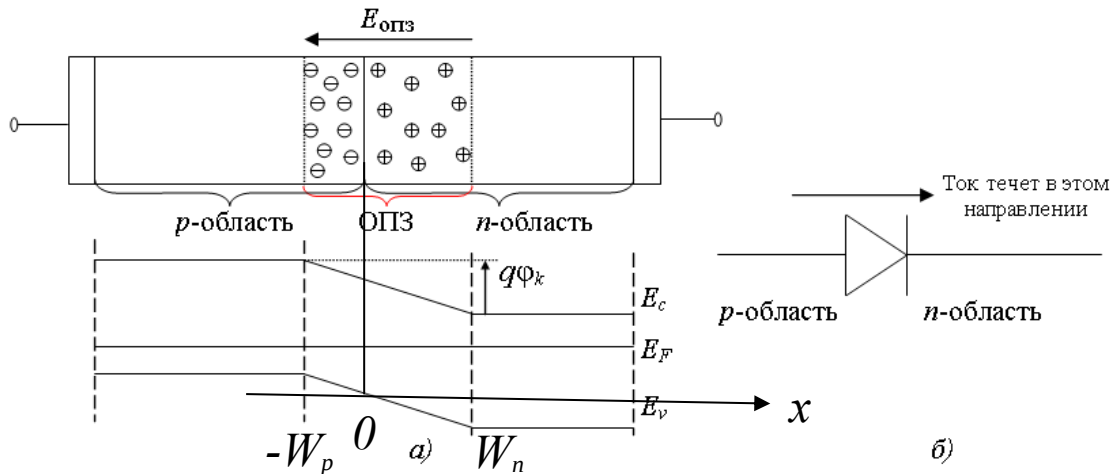


Рис. 1.2. Диод на основе *pn*-перехода (здесь $N_a > N_d$) *p*-область эмиттер, *n*-область – база; а) условная структура диода (*pn*-перехода) и энергетическая диаграмма *pn*-перехода при термо-динамическом равновесии,

На границе областей *n*- и *p*-типа проводимости существует область, обедненная подвижными носителями заряда, – **область пространственного заряда (ОПЗ)** Ширина ОПЗ $W_{ОПЗ} = W_n + W_p$ Нескомпенсированные ионы акцепторов у границы раздела создают отрицательный **объемный заряд** $Q^- = qN_a^-$, нескомпенсированные ионы донорной примеси создают положительный объемный заряд $Q^+ = qN_d^+$. В результате в ОПЗ образуется **внутреннее** электрическое поле $E_{опз}$, препятствующее перемещению электронов из *n*-области в *p*-область и дырок из *p*-области в *n*-область.

Разность потенциалов между границами ОПЗ ϕ_k называется **контактной разностью потенциалов**. Для резкого (ступенчатого) *pn*-перехода

$$\phi_k = \phi_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \phi_T \ln \frac{N_d}{n_p} = \phi_T \ln \frac{N_a}{p_{n0}}, \quad (1.5)$$

где $\phi_T = k_B T / q$ – тепловой потенциал равный 0,026 В при комнатной температуре, В;

T – абсолютная температура, К;

$k_B = 8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана;

n_i – собственная концентрация носителей заряда, зависящая от материала полупроводника и температуры (см. формулу (2.1)) для комнатной температуры (T_K) $n_{iGe} = 2,4 \cdot 10^{13}$, $n_{iSi} = 1,45 \cdot 10^{10}$, $n_{iGaAs} = 1,8 \cdot 10^6$, см⁻³;

$n_{p0} = n_i^2 / N_a$ и $p_{n0} = n_i^2 / N_d$ – концентрации неосновных носителей заряда в соответствующих областях в состоянии термодинамического равновесия, см⁻³.

При приложении к pn -переходу внешнего напряжения практически все оно падает на ОПЗ, так как ОПЗ имеет наиболее высокое сопротивление. Если «+» источника напряжения соединяется с p -областью, а «-» – с n -областью, внешнее электрическое поле направлено против внутреннего, высота потенциального барьера уменьшается и становится равной $(\phi_k - U)$. Это **прямое** включение. При приближении внешнего напряжения к значению ϕ_k ток через барьер может быть очень значительным и обычно ограничивается дополнительным сопротивлением, чтобы не допустить выгорания прибора.

Если «+» источника напряжения соединяется с n -областью, а «-» – с p -областью, внешнее электрическое поле совпадает по направлению с внутренним, высота потенциального барьера увеличивается и становится равной $\phi_k + U$. Это **обратное** включение.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода на основе pn -перехода показана на рисунке 1.3. При приложении напряжения состояние термодинамического равновесия нарушается. При обратном смещении ОПЗ расширяется, потенциальный барьер повышается, за счет процесса **экстракции** происходит дрейф неосновных носителей заряда через ОПЗ и концентрация неосновных носителей заряда (n_p и p_n) будет меньше равновесной (n_{p0} и p_{n0}).

При приложении прямого смещения носители заряда будут преодолевать понизившийся потенциальный барьер. Электроны за счет разницы концентраций (**диффузии**) будут проникать из n -области в p -область, а дырки – из p -области в n -область, концентрация носителей заряда вблизи ОПЗ будет выше равновесной. Этот процесс называется **инжекцией**. Распределение концентраций носителей заряда при прямом смещении показано на рисунке 1.4.

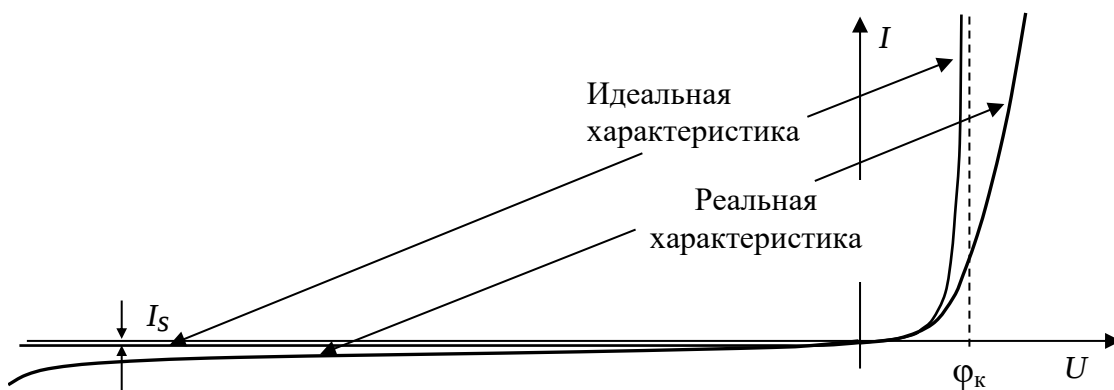


Рис. 1.3. Вольт-амперная характеристика диода

Концентрация носителей заряда на границе ОПЗ:

$$p_n|_{x=W_n} = p_{n0} \exp(U / \phi_T), \quad (1.6)$$

$$n_p|_{x=-W_p} = n_{p0} \exp(U / \phi_T). \quad (1.7)$$

Зависимость распределения концентрации носителей заряда от координаты определяется длиной области. В случае *длинной области*, размер d которой существенно превышает утроенную диффузионную длину неосновных носителей заряда,

$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n|_{x=W_n} - p_{n0}] \exp(-x / L_p). \quad (1.8)$$

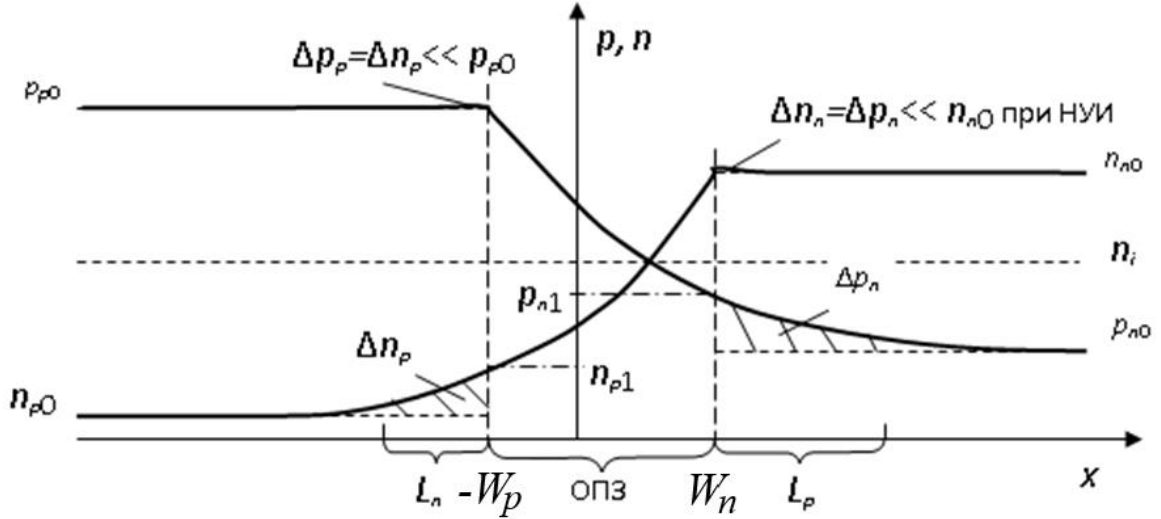


Рис. 1.4. Распределение концентрации носителей при прямом смещении

В случае *короткой области*, размер d которой меньше или порядка трех диффузионных длин,

$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n|_{x=W_n} - p_{n0}] \frac{\text{sh} \frac{d_n - x}{L_p}}{\text{sh} \frac{d_n}{L_p}}. \quad (1.9)$$

Для расчета распределения концентрации электронов формулы аналогичные.

Если количество инжектированных неосновных носителей заряда много меньше количества основных носителей заряда ($\Delta n_p \ll p_{p0}$, $\Delta p_n \ll n_{n0}$) – это **низкий уровень инжекции (НУИ)**.

Плотность диффузионного тока дырок на границе ОПЗ ($x = W_n$) экспоненциально зависит от напряжения смещения U :

$$j_p^{\text{диф}} = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{U}{\phi_T}\right) - 1 \right], \quad (1.10)$$

плотность диффузионного тока электронов на границе ОПЗ ($x = -W_p$):

$$j_n^{\text{диф}} = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{U}{\Phi_T}\right) - 1 \right], \quad (1.11)$$

где D_n и D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок, $\text{см}^2/\text{с}$;

$$\begin{aligned} D_n &= \Phi_T \mu_n, \\ D_p &= \Phi_T \mu_p, \end{aligned} \quad (1.12)$$

L_n – диффузионная длина электронов в p -области, см ;

L_p – диффузионная длина дырок в n -области, см ;

$$\begin{aligned} L_n &= \sqrt{D_n \tau_n}, \\ L_p &= \sqrt{D_p \tau_p}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

где τ_n – время жизни электронов в p -области, с ;

τ_p – время жизни дырок в n -области, с .

При условии низкого уровня инжекции и отсутствии генерации и рекомбинации носителей заряда в ОПЗ полная плотность тока через диод:

$$j(U) = j_s \cdot (e^{U/\Phi_T} - 1), \quad (1.14)$$

где j_s – плотность **тока насыщения**:

$$j_s = j_{ns} + j_{ps} = q \cdot \left(\frac{D_n \cdot n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p \cdot p_{n0}}{L_p} \right) = q \cdot n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n \cdot N_a} + \frac{D_p}{L_p \cdot N_d} \right). \quad (1.15)$$

Умножив плотность тока на площадь pn -перехода S , получим ток через диод:

$$I(U) = I_s \cdot (e^{U/\Phi_T} - 1), \quad (1.16)$$

При $U > 0$ ток экспоненциально растет с увеличением напряжения $I \propto \exp(U)$, а при $U < 0$ ток через pn -переход ограничивается током насыщения $I \rightarrow -I_s$.

Формула (1.16) описывает ВАХ **идеализированного** pn -перехода. В реальных диодах напряжение U_d падает не только на ОПЗ U_{pn} , но и на слаболегированной области диода – **базе** – $I \cdot R_B$:

$$U_d = U_{pn} + I(U_{pn}) \cdot R_B(U_{pn}), \quad (1.17)$$

где U_{pn} – напряжение на pn -переходе, В;

$I(U_{pn})$ – ток через диод, А;

R_B – сопротивление квазинейтральной базовой области, Ом.

Сопротивление базы

$$R_B(U_{pn}) = \frac{1}{\sigma_B} \cdot \frac{I_B(U_{pn})}{S_{pn}}, \quad (1.18)$$

где σ_B – электропроводность базы, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$;

$I_B(U_{pn}) = d_B - W_B(U_{pn})$ – технологическая ширина базы d_B за вычетом уширения ОПЗ в базу. W_B совпадает с W_n в случае структуры p^+n и с W_p в случае структуры n^+p .

При обратном смещении ток через диод увеличивается из-за генерации электронно-дырочных пар в ОПЗ, при прямом смещении рекомбинация носителей в ОПЗ увеличивает общий ток. Плотность тока рекомбинации-генерации носителей заряда в ОПЗ:

$$j_{RG}(U) = \frac{qn_i W_{\text{ОПЗ}}(U)}{\tau_{\text{эфф}}}, \quad (1.19)$$

где $W_{\text{ОПЗ}}(U)$ – ширина ОПЗ, см; она зависит от смещения. Для рассматриваемого ступенчатого pn -перехода ширина ОПЗ:

$$W_{\text{ОПЗ}}(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{q}(\phi_k - U)\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}, \quad (1.20)$$

где $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14}$ Ф/см – электрическая постоянная;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала (равна 12, 16 и 12,9 для Si, Ge и GaAs соответственно);

$\tau_{\text{эфф}}$ – эффективное время жизни носителей заряда, с:

$$\tau_{\text{эфф}} \cong \sqrt{\tau_p \tau_n} \ln \frac{\tau_p}{\tau_n}. \quad (1.21)$$

С учётом генерационно-рекомбинационного тока и сопротивления слаболегированной области вольт-амперная характеристика реального диода описывается выражением

$$\begin{cases} I(U_{pn}) = I_S \left[\exp\left(\frac{U_{pn}}{\phi_T}\right) - 1 \right] + I_{GR}(U_{pn}) \left[\exp\left(\frac{U_{pn}}{2 \cdot \phi_T}\right) - 1 \right], \\ U_D(U_{pn}) = U_{pn} + I(U_{pn}) \cdot R_B(U_{pn}). \end{cases} \quad (1.22)$$

Влияние эффектов **высокого уровня инжекции (ВУИ)**, при котором концентрация инжектированных носителей заряда становится сравнима с равновесной концентрацией, тоже искажает ВАХ. Прямая ветвь ВАХ диода показана на рисунках 1.5, 1.6.

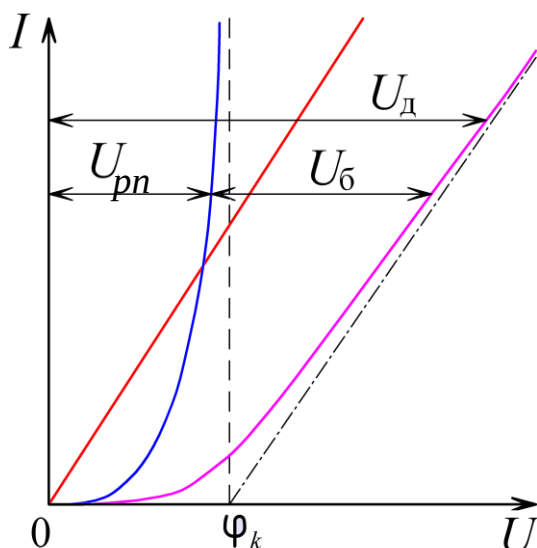


Рис. 1.5. ВАХ с учетом сопротивления базы в линейном масштабе

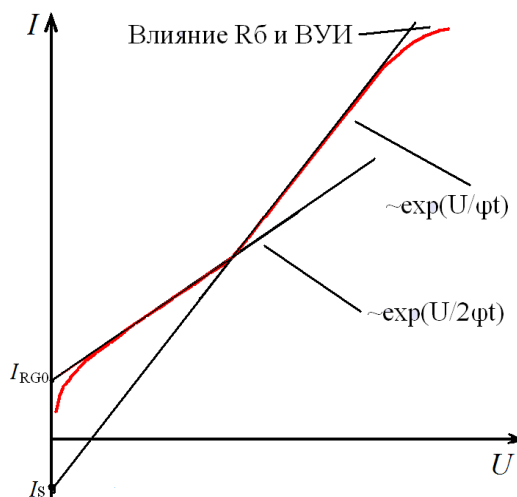


Рис. 1.6. Прямая ветвь ВАХ полупроводникового диода в полулогарифмическом масштабе

Кроме того, вследствие саморазогрева прибора (выделение мощности $P = I \cdot U$) растет температура, и меняются параметры pn -перехода (см. Лабораторную работу № 2). При приложении большого обратного напряжения происходит **пробой** из-за лавинного увеличения количества носителей заряда в ОПЗ или в результате туннелирования электронов через ОПЗ. Он может перейти в тепловой пробой, ведущий к необратимому изменению характеристик.

Согласно теории pn -перехода при прямом смещении $I \propto \exp(U / \phi_T)$. При изменении тока в 10 раз (на декаду) напряжение получает приращение $\Delta U = 2,3\phi_T$. Путем экстраполяции прямой ветви ВАХ идеализированного pn -перехода, построенной в полулогарифмическом масштабе, то есть в координатах $\lg I - U$ (рисунок 1.6), к напряжению $U = 0$ можно найти значение тока насыщения I_s . В области малых напряжений наклон ВАХ кремниевых диодов может быть меньше и определяться показателем экспоненты $I \propto \exp(U / m\phi_T)$. Если наклон соответствует коэффициенту $m = 2$, то преобладающим механизмом, определяющим протекание тока в диоде, считаются процессы генерации и рекомбинации носителей заряда в ОПЗ, что позволяет экстраполяцией участка с приращением напряжения на декаду тока равном $\Delta U = 2,3m\phi_T = 4,6\phi_T$ найти значение тока I_{RG0} при $U = 0$.

Домашняя подготовка и предварительный расчет

При домашней подготовке необходимо ознакомиться с типами pn -переходов, изучить принцип работы полупроводникового диода, рассмотреть особенности ВАХ реальных диодов, а также произвести

предварительный расчет. В качестве предварительного расчета к лабораторным работам № 1 и 2 выполняется первая часть типового расчета по дисциплине (до п. 2). В качестве исходных данных для расчета взять данные из задания к типовому расчету согласно номеру в БАРС.

Рабочее задание

1. Для освоения работы со стендом определить точно номинал резистора, выданного преподавателем. Собрать последовательную цепь, состоящую из источника напряжения, амперметра и резистора. Параллельно к резистору подключается вольтметр. Установить на источник напряжения 1 В, а затем измерить ток, протекающий в цепи. По полученным данным определить номинал резистора и сравнить его с надписью на резисторе.
2. Получить у преподавателя диод. По справочнику определить материал, из которого изготовлен диод.
3. Собрать последовательную цепь, состоящую из источника напряжения, резистора, диода и амперметра. Параллельно к диоду подсоединить вольтметр. Диод должен быть включен в прямом смещении.

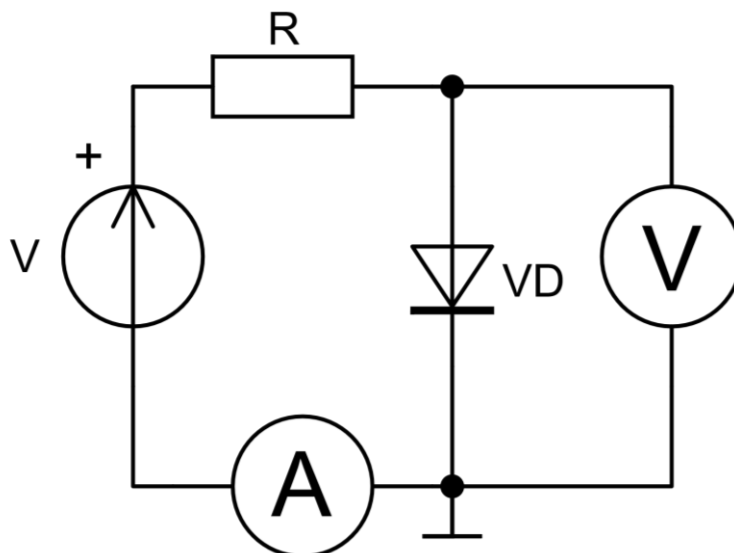


Рис. 1.7. Схема включения диода для измерения прямой ветви ВАХ

4. Провести измерения тока, изменяя напряжение в диапазоне от 0 В до значения, при котором ток достигает 3 мА.
5. Включить диод в обратной полярности.

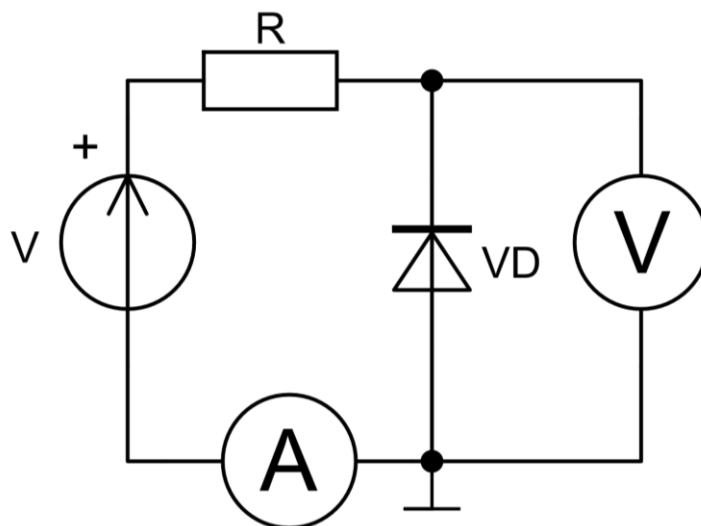


Рис. 1.8. Схема включения диода для измерения обратной ветви ВАХ

6. Провести измерения обратной ветви ВАХ от 0 В до -1.5 В.
7. Построить измеренные графики ВАХ диодов в линейных масштабах по осям.
8. По усмотрению преподавателя, получить второй и третий диоды и повторить пп. 3-7.

Анализ результатов измерений

1. Графически оцените значение ϕ_k . При больших значениях прямого тока падение напряжения на ОПЗ приближается к значению контактной разности потенциалов, то есть $U \approx \phi_k$. Напряжение на диоде $U_d = U_{pn} + I \cdot R_B$, и, следовательно, при $I = 0$ на оси напряжений отсекается величина, приблизительно равная контактной разности потенциалов ϕ_k .
2. По наклону прямолинейного участка прямой ветви ВАХ, построенной в линейном масштабе (асимптотическая прямая, отсекающая по оси напряжений величину контактной разности потенциалов, рисунок 1.5), оцените значение сопротивления базы R_B .
3. Перестроив график прямой ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе, установите, есть ли на ней участок, соответствующий идеализированной теории pn -перехода. Если такой участок есть, найдите значение тока насыщения I_s . Если наклон в области малых напряжений соответствует коэффициенту $m = 2$, найдите также значение тока I_{RG0} .
4. Полученные результаты объедините в таблицу:

Материал	I_s [A]	I_{RG0} [A]	ϕ_k , [В]	R_B , [Ом]
Ge				
Si				
Светодиод (InP)				

Указания к отчету

Содержание отчета:

1. титульный лист с названием работы, ФИО студента и номер группы;
2. расчет предварительного задания;
3. схема измерения;
4. графики ВАХ диодов в линейном и полулогарифмическом масштабах;
5. результаты анализа экспериментальных данных;
6. выводы по работе: с помощью формул объяснить, как и почему меняются вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов при изменении материала полупроводникового диода.

Контрольные вопросы

1. Каким образом образуются полупроводники p - и n -типа? Как выглядят их энергетические диаграммы?
2. Какие процессы возникают при контакте полупроводников p - и n -типа? Какие заряды образуют ОПЗ?
3. С помощью энергетической диаграммы и формул пояснить, что такое «контактная разность потенциалов»? От каких параметров полупроводникового диода зависит ее величина?
4. Что происходит с величиной потенциального барьера при подаче на pn -переход прямого и обратного напряжений? Нарисуйте и поясните энергетическую диаграмму pn -перехода при нулевом, прямом и обратном смещениях.
5. Что такое «квазиуровень Ферми»?
6. Нарисуйте и объясните зависимости распределения концентрации носителей от координаты при прямом и обратном смещениях. Что такое «инжекция» и «экстракция»?
7. Чем отличается низкий уровень инжекции (НУИ) от высокого уровня инжекции (ВУИ)?
8. Нарисуйте и объясните ВАХ диода.
9. Почему в качестве сопротивления диода рассматривают сопротивление слаболегированной области pn -перехода? Каким образом это сопротивление влияет на вольт-амперную характеристику диода?
10. Какие процессы приводят к появлению генерационно-рекомбинационного тока в pn -переходе? Каким образом этот ток влияет на вольт-амперную характеристику диода?
11. Что такое «статическое» и «дифференциальное» сопротивления диода? Как они определяются? Почему они различаются?

Лабораторная работа № 2. Исследование температурной зависимости статических вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов

Цель работы: приобретение навыков экспериментального исследования температурной зависимости ВАХ полупроводниковых диодов.

Повышение температуры приводит к росту собственной концентрации носителей:

$$n_i(T) = \sqrt{N_c(T)N_v(T)} \exp\left[-\frac{E_g(T)}{2k_B T}\right], \quad (2.1)$$

где $E_g = E_c - E_v$ – ширина запрещенной зоны, эВ. Она зависит от температуры:

$$E_g(T) = E_{g0} + \alpha T, \quad (2.2)$$

где E_{g0} – ширина запрещенной зоны при 0 К, эВ;

α – температурный коэффициент ширины запрещенной зоны, эВ/К.

Данные по параметрам температурной зависимости ширины запрещенной зоны для различных материалов сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Параметры ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов

Материал	Ge	Si	GaAs
E_{g0} , эВ	0,74	1,17	1,52
α , эВ/К	$-2,4 \cdot 10^{-4}$	$-3,9 \cdot 10^{-4}$	$-4,3 \cdot 10^{-4}$

Это приводит к росту тока насыщения (рисунок 2.1),

$$\begin{aligned} j_s(T) &= q \frac{D_n(T)}{L_n(T)} n_{p0}(T) + q \frac{D_p(T)}{L_p(T)} p_{n0}(T) = \\ &= q n_i^2(T) \left[\frac{D_n(T)}{L_n(T) N_a} + \frac{D_p(T)}{L_p(T) N_d} \right]. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Таким образом, для расчета ВАХ при температуре T необходимо рассчитать значение тока насыщения и сопротивления базы диода. Для этого необходимо рассчитать значения концентраций неосновных носителей заряда и подвижности носителей заряда при заданной температуре. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда n в полупроводнике, легированном донорной примесью с концентрацией N_d , показана на рис. 2.2.

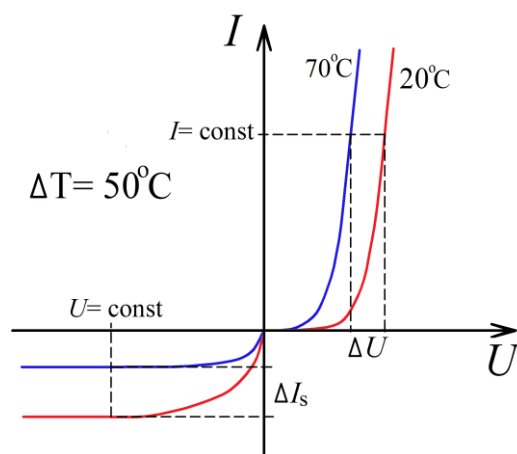


Рис. 2.1. Изменение ВАХ при повышении температуры

При низкой температуре (область 1) концентрация носителей заряда повышается с ростом температуры за счет ионизации атомов примеси.

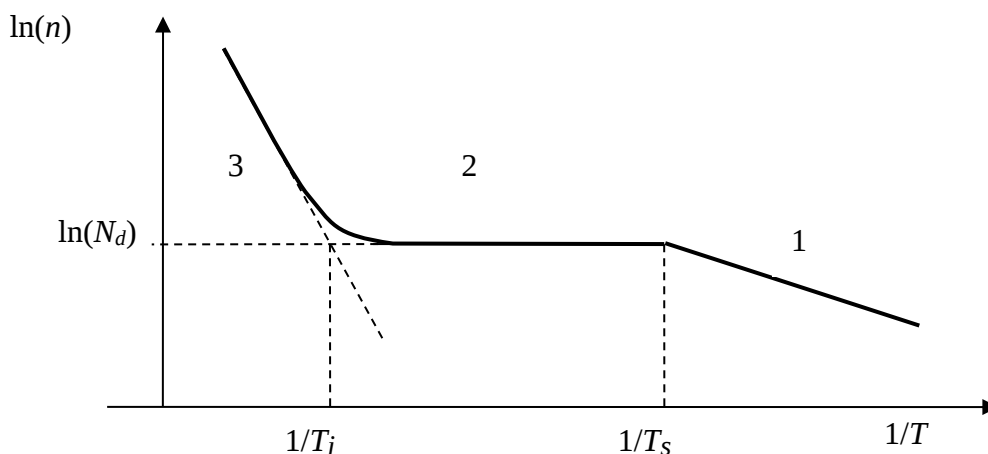


Рис. 2.2. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда

Концентрацию свободных носителей заряда в области 1, называемой **областью слабой ионизации примеси**, можно оценить по формуле (2.4), если полупроводник легирован донорной примесью (n -тип проводимости), или по формуле (2.5), если полупроводник легирован акцепторной примесью (p -тип проводимости).

$$n_0 = \sqrt{N_c N_d} \exp\left(-\frac{E_c - E_d}{k_B T}\right), \quad (2.4)$$

$$p_0 = \sqrt{N_a N_v} \exp\left(-\frac{E_a - E_v}{k_B T}\right), \quad (2.5)$$

где N_d , N_a – концентрация легирующей примеси, см^{-3} ;

N_c, N_v – **эффективная плотность квантовых состояний** (количество разрешенных уровней в единице объема материала) в зоне проводимости и в валентной зоне соответственно, см^{-3} .

Данные по температурной зависимости эффективной плотности квантовых состояний в зоне проводимости и в валентной зоне сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Эффективная плотность состояний полупроводниковых материалов

Материал	$N_c, \text{см}^{-3}$	$N_v, \text{см}^{-3}$
Ge	$1,04 \cdot 10^{19} \cdot (T/T_0)^{3/2}$	$0,6 \cdot 10^{19} \cdot (T/T_0)^{3/2}$
Si	$2,8 \cdot 10^{19} \cdot (T/T_0)^{3/2}$	$1,04 \cdot 10^{19} \cdot (T/T_0)^{3/2}$
GaAs	$0,047 \cdot 10^{19} \cdot (T/T_0)^{3/2}$	$0,07 \cdot 10^{19} \cdot (T/T_0)^{3/2}$

Для заданных в расчетном задании материалов значения подвижности рассчитывается по формулам (1.12, 1.13), а затем по формулам (2.1), (2.3) и (1.16) рассчитаются необходимые ВАХ при трех заданных в расчетном задании температурах.

Домашняя подготовка и предварительный расчет

При домашней подготовке необходимо ознакомиться с температурными зависимостями в полупроводниковых диодах, а также произвести предварительный расчет. В качестве предварительного расчета к лабораторным работам № 1 и 2 выполняется первая часть типового расчета по дисциплине (до п. 2). В качестве исходных данных для расчета взять данные из задания к типовому расчету согласно номеру в БАРС.

Рабочее задание

1. Получить у преподавателя диод.
2. Поместить диод в нагревательную камеру.
3. Подключить диод в прямом смещении (рис. 1.7).
4. Установить на нагревательной установке температуру в 30 градусов и подождать, пока в нагревательной камере установится эта температура.
5. Записать результаты измерений с амперметра и вольтметра для прямой ветви ВАХ, измерения проводить до 3 мА.
6. Переключить диод в обратное смещение (рис. 1.8).
7. Записать результаты измерений для обратной ветви ВАХ, измерения проводить от 0 В до 1.5 В.
8. Провести нагрев измерительной камеры до 40 градусов и повторить измерение ВАХ.
9. Повторить измерения при 50 градусах.
10. Построить графики ВАХ диодов (при разных температурах на одном графике) в линейных масштабах по осям и в полулогарифмическом масштабе.

11. По усмотрению преподавателя, получить второй диод и повторить пп. 2-10.

12. Полученные результаты объедините в таблицу:

Температура, [°C]	I_s [A]	I_{RG0} [A]	φ_k , [В]	R_B , [Ом]
T_k				
30				
40				
50				

Анализ результатов измерений

1. Графически оцените значения φ_k при различных температурах. Постройте график зависимости контактной разности потенциалов от температуры. Объясните полученную зависимость.
2. Перестройте графики ВАХ диодов (при разных температурах на одном графике) в полулогарифмическом масштабе, определите значения I_s и I_{RG} (как на рис. 1.6)
3. Сравните экспериментально полученные ВАХ диодов с теоретическими, с помощью формул объясните разницу.

Указания к отчету

Отчет должен содержать:

1. титульный лист с названием работы, ФИО студента и номер группы;
2. расчет предварительного задания;
3. схему измерения;
4. графики ВАХ диодов;
5. результаты анализа экспериментальных данных;
6. вывод о влиянии температуры на величину контактной разности потенциалов и ВАХ диодов.

Контрольные вопросы

1. Объясните зависимость от температуры концентрации носителей заряда и положения уровня Ферми.
2. Объясните зависимость подвижности от температуры и от концентрации ионов примеси.
3. Объясните электропроводность полупроводников и ее зависимость от температуры. Поясните, каким образом осуществляется определение ширины запрещенной зоны E_g и энергии активации проводимости $E_{акт}$ по температурным зависимостям электропроводности.

4. Какие параметры диода изменяются при повышении температуры? Почему?
5. Каким образом определяется температурный диапазон работы полупроводникового прибора? В этом диапазоне концентрация основных носителей заряда не должна изменяться.
6. Объясните изменение ВАХ диодов при повышении температуры.

Лабораторная работа № 3. Исследование статических характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой

Цель работы: изучение принципа работы и приобретение навыков экспериментального исследования ВАХ биполярных полупроводниковых транзисторов.

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя *pn*-переходами и тремя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями **инжекции** и **экстракции** неосновных носителей заряда. Биполярный транзистор – это активный прибор, так как он позволяет осуществлять усиление мощности.

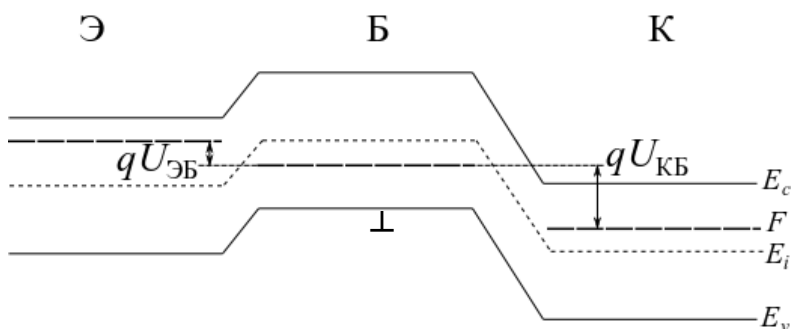


Рис. 3.1. Биполярный *pnp*-транзистор в активном режиме с «заземленной» базой

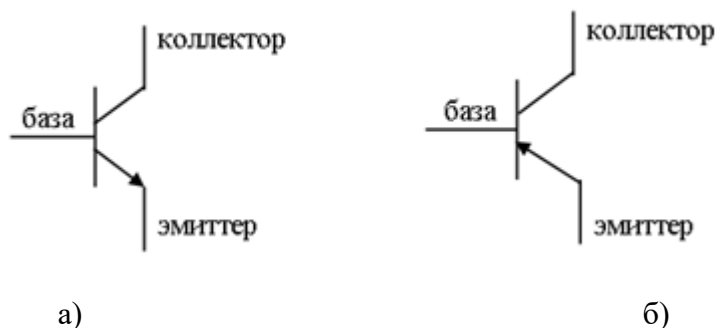


Рис. 3.2. Условное обозначение биполярного транзистора:

а) *pnp*-транзистор; б) *npn*-транзистор.

Биполярный транзистор состоит из трех областей чередующегося типа электропроводности (рисунок 3.1), которые образуют два *pn*-перехода, расположенных в непосредственной близости один от другого. В зависимости от порядка расположения областей различают ***pnp***- и ***npn***-транзисторы. Условное обозначение транзистора показано на рисунке 3.2. В **активном режиме** работы транзистора (режиме усиления мощности) на **эмиттерный** переход подается **прямое смещение**, а на **коллекторный** переход – **обратное**.

Транзистор может быть включен по схеме с **общей базой** (ОБ, базовый вывод, являющийся общим для входной и выходной цепей), с **общим эмиттером** (ОЭ, эмиттерный выход является общим как для входа, так и для выхода) и **общим коллектором** (ОК, коллектор является общим для входа и для выхода). Схемы включения транзистора показаны на рисунке 3.3.

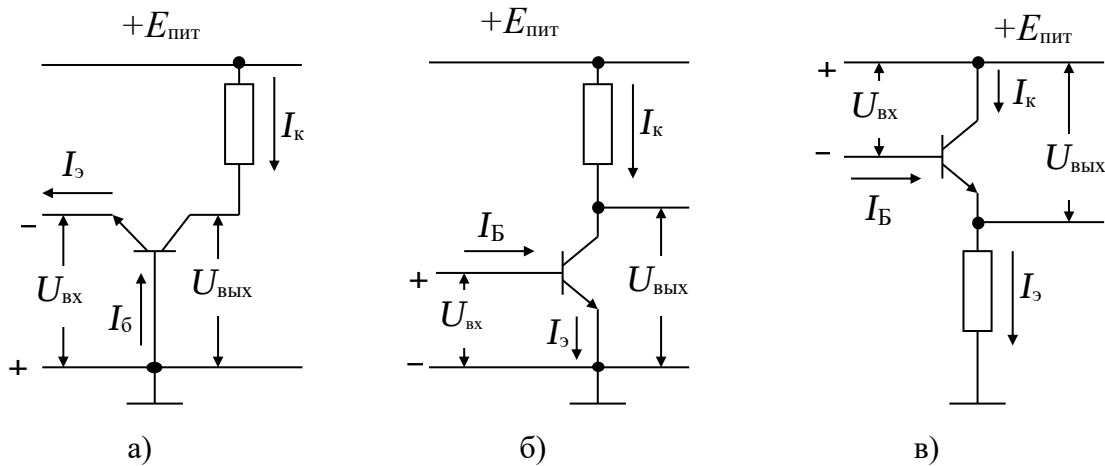


Рис. 3.3. Схемы включения транзистора:

а) общая база, б) общий эмиттер и в) общий коллектор

В *pn*-транзисторе (рис. 3.1) эмиттерный *pn*-переход при прямом смещении инжектирует электроны из эмиттера в **базовую** область транзистора. Как правило, концентрация легирующей примеси в эмиттере значительно больше, чем в базе, в этом случае ток электронов $I_{\text{эн}}$, инжектируемых в базу, практически равен полному току эмиттера $I_{\text{э}}$. Эффективность эмиттера характеризуется **коэффициентом инжекции** $\gamma = I_{\text{эн}}/I_{\text{э}}$, который должен быть близок к единице.

Часть электронов, инжектированных эмиттером, будет рекомбинировать в базе с дырками. Если эффективная толщина базы $W_{\text{б}}$ (с учётом уширения областей пространственного заряда эмиттерного и коллекторного переходов) много меньше диффузионной длины электронов в базе L_n , то большинство электронов дойдет до коллектора. Коллекторный переход смещен в обратном направлении, поэтому все электроны, дошедшие до ОПЗ коллектора, будут захвачены электрическим полем перехода и переброшены в квазинейтральную область коллектора – произойдет экстракция электронов коллектором. Эффективность перемещения неосновных носителей заряда через базу характеризуется **коэффициентом переноса** $\kappa = I_{\text{нк}}/I_{\text{нэ}}$, где $I_{\text{нк}}$ – ток электронов, достигающих границы ОПЗ коллекторного перехода. Значение κ в транзисторе с малым отношением $W_{\text{б}}/L_n$ близко к единице.

При токе эмиттера $I_{\text{Э}} = 0$ через коллекторный переход протекает обратный ток, обусловленный приложенным к нему обратным напряжением, как в изолированном pn -переходе, $I_{\text{К}} = I_{\text{К}0} \cdot [\exp(U_{\text{КБ}}/\phi_T) - 1]$, где $I_{\text{К}0}$ – обратный ток насыщения коллекторного перехода, $U_{\text{КБ}}$ – напряжение, приложенное к переходу коллектор-база. Учитывая, что управляемая эмиттером составляющая тока коллектора равна $\alpha_N I_{\text{Э}}$, полный ток коллектора:

$$I_{\text{К}} = \alpha_N \cdot I_{\text{Э}} - I_{\text{К}0} \cdot [\exp(U_{\text{КБ}}/\phi_T) - 1], \quad (3.1)$$

где $\alpha_N = \gamma \cdot \kappa$ – **коэффициент передачи тока эмиттера при нормальном включении**, то есть, когда эмиттер инжектирует электроны, а коллектор – собирает. (Возможен и **инверсный режим**, когда коллектор инжектирует электроны, а эмиттер – собирает.)

Зависимостью $I_{\text{К}}(U_{\text{КБ}})$ при постоянном $I_{\text{Э}}$ определяется семейство **выходных ВАХ** (рисунок 3.4, а) транзистора с общей базой. Семейство **входных ВАХ** (рисунок 3.4, б) транзистора с ОБ представляет собой зависимость $I_{\text{Э}}(U_{\text{ЭБ}})$, параметром семейства является $U_{\text{КБ}}$.

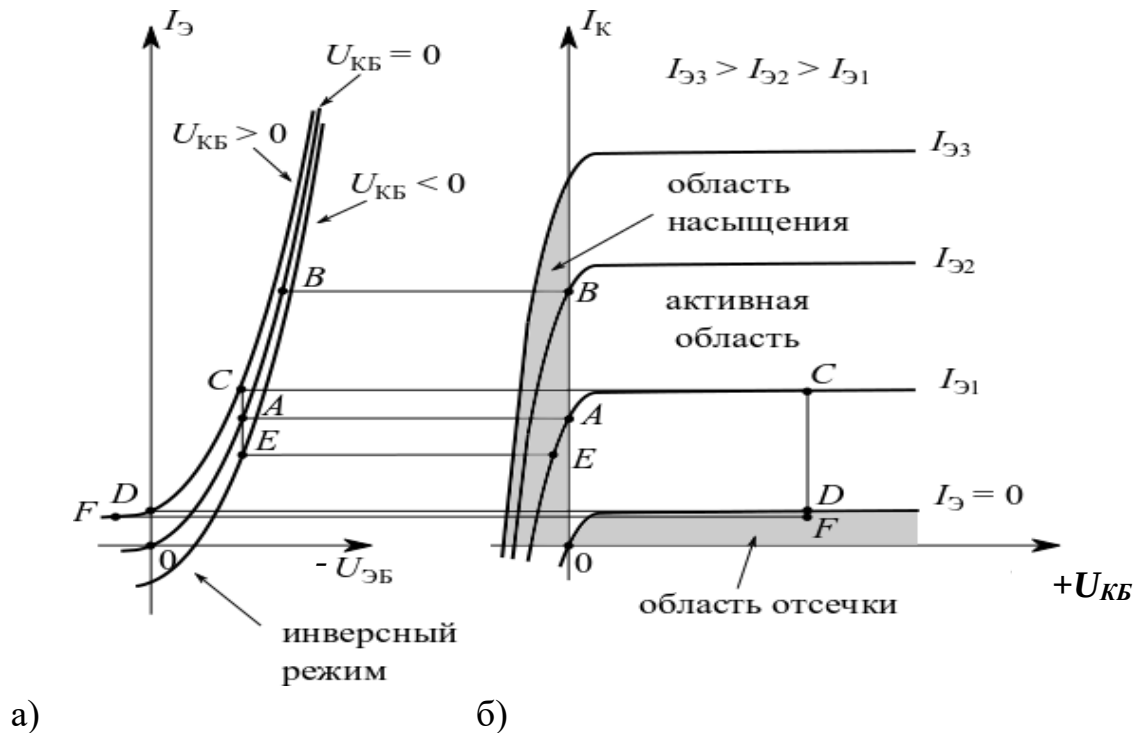


Рис. 3.4. Входные (а) и выходные (б) ВАХ npn -транзистора с ОБ

В зависимости от соотношения полярности напряжений на pn -переходах различают:

- активный (усилительный) режим, при котором эмиттер смещен прямо, а коллектор – обратно;

- режим **насыщения**, при котором коллекторный и эмиттерный переходы смещены в прямом направлении и инжектируют неосновные носители заряда в базу;
- режим **отсечки**, при котором оба *pn*-перехода обратно смещены, ток коллектора очень мал и равен I_{K0} .

Физические процессы в биполярном транзисторе можно описать системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{Э}} &= \frac{I_{\text{Э}0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{\alpha_I I_{K0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right), \\
 I_K &= \frac{\alpha_N I_{\text{Э}0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{I_{K0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right), \\
 I_B &= I_{\text{Э}} - I_K = \frac{I_{\text{Э}0}(1 - \alpha_N)}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{I_{K0}(1 - \alpha_I)}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right),
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

где α_N – нормальный коэффициент передачи тока;

α_I – инверсный коэффициент передачи тока;

$I_{\text{Э}0}$ и I_{K0} – токи насыщения эмиттерного и коллекторного *pn*-переходов:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{Э}0} &= S_{\text{Э}}(j_{\text{Э}sn} + j_{\text{Э}sp}), \\
 I_{K0} &= S_K(j_{Ksn} + j_{Ksp}).
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Коэффициент передачи тока эмиттера является важнейшим параметром транзистора. В *npn*-транзисторе:

$$\begin{aligned}
 \alpha_N &= \frac{dI_K}{dI_{\text{Э}}} \approx \left(1 + \frac{D_{p\text{Э}} \cdot N_{a\text{Б}}}{D_{n\text{Б}} \cdot N_{d\text{Э}}} \cdot \frac{W_{\text{Б}}}{L_{p\text{Э}}} \right)^{-1}, \\
 \alpha_I &= \frac{dI_{\text{Э}}}{dI_K} \approx \left(1 + \frac{D_{pK} \cdot N_{a\text{Б}}}{D_{n\text{Б}} \cdot N_{dK}} \cdot \frac{W_{\text{Б}}}{L_{pK}} \right)^{-1} \cdot \frac{S_{\text{Э}}}{S_K},
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

где $N_{\text{Б}}$, $N_{\text{Э}}$, N_K – концентрации легирующей примеси в базе, эмиттере, коллекторе;

$S_{\text{Э}}$ и S_K – площади эмиттерного и коллекторного переходов соответственно.

Группа уравнений (3.2) и соответствующая электрическая модель (рисунок 3.5) называются **моделью Эберса-Молла**. Для более полного представления свойств транзистора модель дополнена омическими сопротивлениями квазиэлектронейтральных областей эмиттера, базы и коллектора.

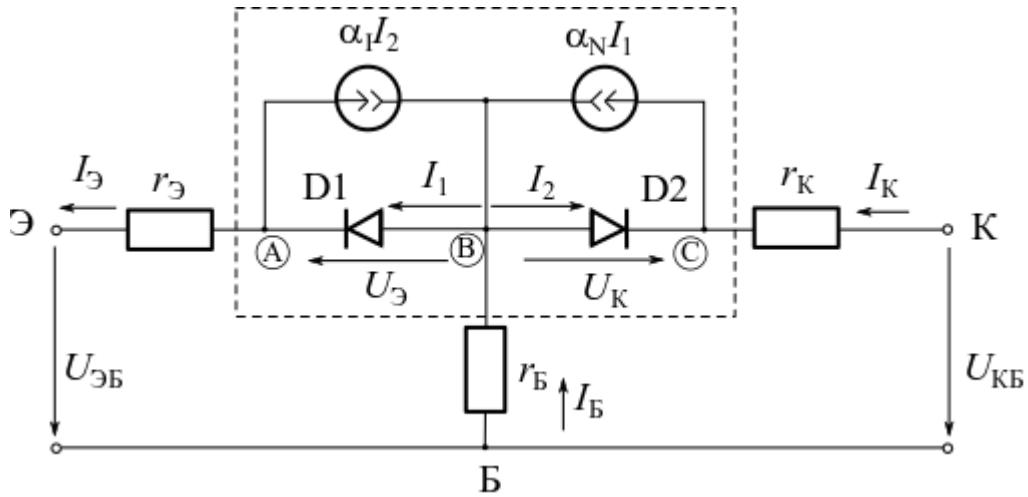


Рис. 3.5. Эквивалентная схема модели Эберса-Молла для *npn*-транзистора

Допущения:

- сопротивления квазинейтральных областей $r_{\text{Э}} = r_{\text{Б}} = r_{\text{К}} = 0$;
- токи *pn*-переходов определяются уравнением идеальной ВАХ

pn-перехода, то есть $I_1 = I_{\text{Э0}} \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\Phi_T} - 1 \right)$, $I_2 = I_{\text{К0}} \left(\exp \frac{U_{\text{К}}}{\Phi_T} - 1 \right)$, где

$I_{\text{Э0}}, I_{\text{К0}}$ – обратные токи (токи насыщения) эмиттерного и коллекторного переходов.

В активном режиме работы транзистора коллекторный переход смещен в обратном направлении, это означает, что коллекторный ток согласно (3.1) $I_{\text{К}} \rightarrow I_{\text{К0}}$ в отсутствие тока эмиттера. Это обратный ток *pn*-перехода, он очень мал и им можно пренебречь (считаем, что ток I_2 на рисунке 3.5 равен нулю). Тогда $I_{\text{Э}} = I_{\text{Э0}} \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\Phi_T} - 1 \right)$ – это ток прямо смещенного эмиттерного перехода (I_1 на рисунке 3.5), а ток коллектора равен $I_{\text{К}} = \alpha_N I_{\text{Э0}} \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\Phi_T} - 1 \right)$ (ток источника $\alpha_N I_1$).

При повышенном обратном напряжении на ОПЗ коллектора электроны могут вызвать ударную ионизацию носителей заряда, произойдет лавинное умножение их количества, все токи, пересекающие *pn*-переход, увеличатся в M раз (M – коэффициент лавинного умножения). Лавинное умножение может приводить к нестабильной работе транзистора, поэтому при усилении электрических сигналов такой режим не используют. Задают такое $U_{\text{КБ}}$, что $M \approx 1$.

Моделирование ВАХ

Система уравнений по модели Эберса-Молла:

$$I_{\text{Э}} = \frac{I_{\text{Э0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{\alpha_I I_{\text{К0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{КБ}}}{\phi_T} - 1 \right), \quad (3.5)$$

$$I_{\text{К}} = \frac{\alpha_N I_{\text{Э0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{I_{\text{К0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{КБ}}}{\phi_T} - 1 \right), \quad (3.6)$$

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}} = \frac{I_{\text{Э0}}(1 - \alpha_N)}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{I_{\text{К0}}(1 - \alpha_I)}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{КБ}}}{\phi_T} - 1 \right), \quad (3.7)$$

где $U_{\text{ЭБ}}$, $U_{\text{КБ}}$ – напряжения на эмиттерном и коллекторном переходе, учитывающие тип транзистора (*npr*- или *pnp*-). Так, например, для обеспечения активного нормального режима работы *npr*-транзистора необходимо $U_{\text{ЭБ}} < 0, U_{\text{КБ}} > 0$; а для *pnp*- $U_{\text{ЭБ}} > 0, U_{\text{КБ}} < 0$.

Обратите внимание, что при этом на графиках ВАХ стоит $+U$ и $-U$, где знак «+» соответствует прямому смещению, а знак «-» – обратному! В дальнейших выражениях нет привязки к типу транзистора и при построении ВАХ необходимо учитывать знаки напряжений!

Входная характеристика (рис. 3.6)

Из уравнения (3.5) получаем:

$$I_{\text{Э}}(U_{\text{ЭБ}})|_{U_{\text{КБ}}=\text{const}} = \frac{I_{\text{Э0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{\alpha_I I_{\text{К0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{КБ}}}{\phi_T} - 1 \right). \quad (3.8)$$

Из-за $\alpha_I \ll 1$, а также $U_{\text{КБ}} < 0$ смещение входной характеристики в результате изменения $U_{\text{КБ}}$ практически не заметно.

Выходная характеристика (рис. 3.7)

Из входной характеристики выражаем $\frac{I_{\text{Э0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right)$:

$$\frac{I_{\text{Э0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) = I_{\text{Э}} + \frac{\alpha_I I_{\text{К0}}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \left(\exp \frac{U_{\text{КБ}}}{\phi_T} - 1 \right)$$

и подставляем в (3.6). Получаем выражение для выходной вольт-амперной характеристики

$$I_{\text{К}}(U_{\text{КБ}})|_{I_{\text{Э}}=\text{const}} = \alpha_N I_{\text{Э}} - I_{\text{К0}} \left(\exp \frac{U_{\text{КБ}}}{\phi_T} - 1 \right). \quad (3.9)$$

Все графики представлены с исходными параметрами $I_{\text{Э0}} = I_{\text{К0}} = 10^{-14}$ А, $\alpha_N = 0,98$, $\alpha_I = 0,01$.

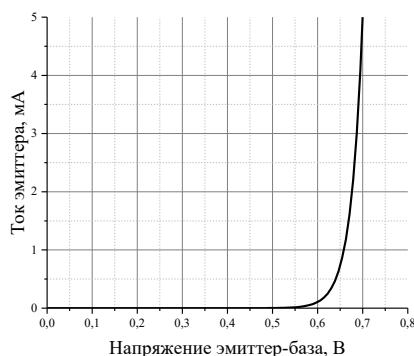


Рис. 3.6. Входная ВАХ при напряжении коллектор-база -5 В

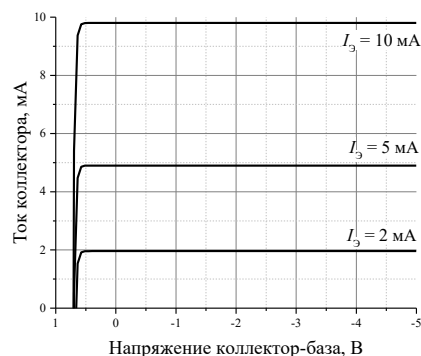


Рис. 3.7. Выходная ВАХ при трех значениях тока эмиттера

Для транзистора с ОБ коэффициент усиления по току $\Delta I_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вх}} = \alpha_N < 1$, т.е. усиления тока не происходит. Однако транзистор с ОБ позволяет получить большое усиление по напряжению ($\Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$). Коэффициент усиления по мощности ($\Delta P_{\text{вых}} / \Delta P_{\text{вх}}$) транзистора с ОБ может быть заметно больше единицы. Выходное дифференциальное сопротивление транзистора в пологой области велико, входное дифференциальное сопротивление транзистора, определяемое по входной ВАХ прямосмещенного эмиттерного перехода, значительно меньше выходного.

При домашней подготовке необходимо ознакомиться с принципом работы биполярного транзистора.

Предварительное расчетное задание

1. Провести расчет основных параметров транзистора: α_N , α_I по формулам (3.4) и токов $I_{\text{Э0}}$, $I_{\text{К0}}$, используя формулы, приведенные в лабораторной работе №1.
2. Построить входную ВАХ при обратном смещении на коллекторном переходе $|U_{\text{КБ}}| = 5 \text{ В}$.
3. Построить выходные ВАХ при $I_{\text{Э}} = 2 \text{ мА}$; 4 мА ; 6 мА ; 10 мА . Также на отдельном графике постройте выходную ВАХ при токе эмиттера равном 0 А .

Данные к расчету

Тип транзистора *npn*, материал – кремний для нечетных вариантов и германий для четных вариантов.

Концентрация атомов примеси в эмиттере	$N_{\text{Э}} = ((N_{\text{Ж}} + 1)/2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
Концентрация атомов примеси в базе	$N_{\text{Б}} = N_{\text{Ж}} \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, где $N_{\text{Ж}}$ – номер фамилии студента в журнале группы.
Концентрация атомов примеси в коллекторе	$N_{\text{К}} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Протяженность (длина) базы	$W_{\text{Б}} = 1 \text{ мкм}$

Площади pn -переходов	$S_{\text{Э}} = 2000 \text{ мкм}^2$ $S_{\text{К}} = 10000 \text{ мкм}^2$
Время жизни электронов в базе	$\tau_{\text{Б}} = 100 \text{ нс}$
Время жизни дырок в эмиттере	$\tau_{\text{Э}} = 1 \text{ нс}$
Время жизни дырок в коллекторе	$\tau_{\text{К}} = 50 \text{ нс}$

Рабочее задание

1. Получить у преподавателя транзистор/
2. Записать в рабочий журнал тип транзистора и материал, из которого он сделан, пользуясь справочником.
3. Подключить транзистор в соответствии со схемой, указанной на рисунке 3.8 для ррр-транзистора или указанной на рисунке 3.9 для прп-транзистора.

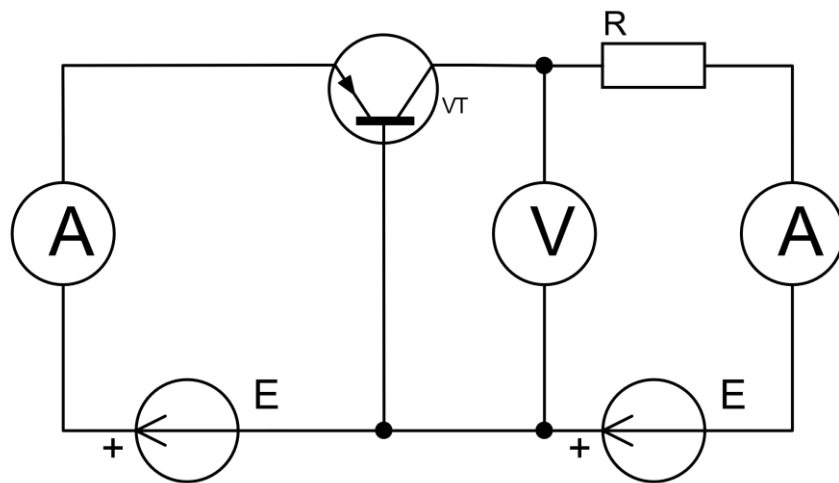


Рис. 3.8. Схема включения биполярного ррр-транзистора по схеме с общей базой

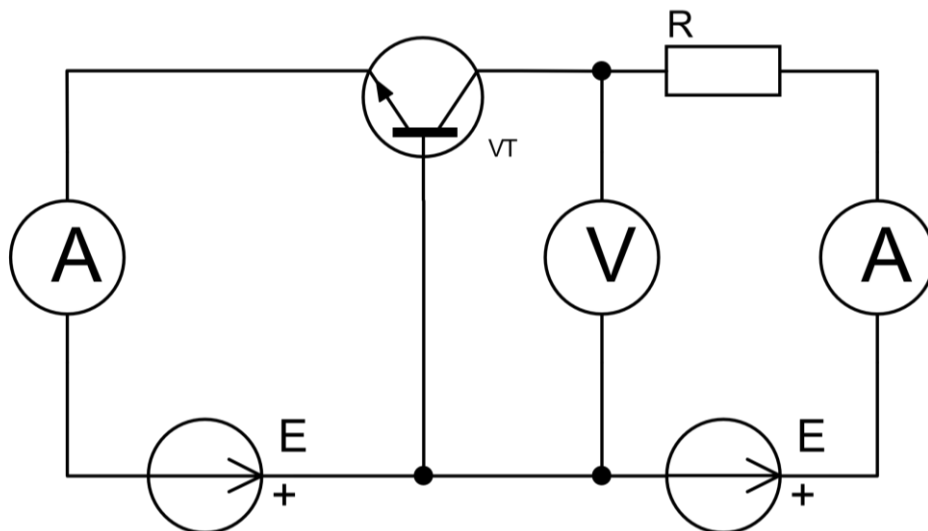


Рис. 3.9. Схема включения биполярного прп-транзистора по схеме с общей базой

4. На источнике эмиттера нужно установить ток 1 мА.
5. Источник на коллекторе нужно переключить таким образом, чтобы ток коллектора стал нулевым. Если не удастся уменьшить напряжение на

коллекторе до значения, при котором ток становится нулевым, то следует поменять местами контакты на коллекторном источнике (если используется внутренний источник стенда, то следует поменять источник «SUPPLY-» на «SUPPLY+»), и выставить ток в ноль.

6. Удерживая ток на эмиттере неизменным, провести измерение выходной ВАХ в диапазоне от установленного на коллекторном источнике напряжения до напряжения -2.5 В.

7. Повторить измерения выходной ВАХ несколько раз для значений тока эмиттера по указанию преподавателя.

Анализ результатов измерений

1. Рассчитать выходное сопротивление $r_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{КБ}} / \Delta I_{\text{К}}$ в трёх областях: насыщения, активная и промежуточная область. Объясните полученные результаты.

2. Постройте зависимость коэффициента передачи тока α_N от тока эмиттера при фиксированном значении $U_{\text{КБ}}$ ($|U_{\text{КБ}}| > 3 \text{ В}$). Объясните полученную зависимость.

3. Сравните экспериментально полученные вольт-амперные характеристики транзистора, включенного с общей базой, с рассчитанными, объясните различия.

Указания к отчету

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист с названием работы, ф.и.о. студента и номер группы;
2. Расчет предварительного задания;
3. Схему измерения;
4. Таблицы экспериментальных данных и графики ВАХ.
5. Результаты анализа результатов измерений.

Контрольные вопросы

1. Объясните, какие существуют режимы работы биполярного транзистора. Как связаны потенциалы эмиттера, базы и коллектора между собой в каждом из режимов работы для *nnp*- и *pnp*-транзисторов?

2. Какие физические процессы протекают в биполярном транзисторе в активном нормальном режиме работы? На примере *pnp*- или *nnp*-транзистора.

3. Поясните, что характеризуют и как определяются коэффициент инжекции γ и коэффициент переноса κ ?

4. От каких конструктивно-технологических параметров зависит коэффициент передачи транзистора по току эмиттера α_N ?

5. Как выглядит распределение неосновных носителей заряда в базе биполярного транзистора в каждом из режимов его работы? Поясните распределение.

6. Нарисуйте схему включения биполярного транзистора с общей базой. Нарисуйте для неё входные и выходные характеристики, поясните знаки токов и напряжений.
7. Каковы возможные причины появления различий в расчетных и экспериментальных характеристиках транзистора?
8. Как определить на характеристиках, снятых в схеме с общей базой, границы активной области, области насыщения и области отсечки?
9. Расскажите об усилении тока, напряжения и мощности для схемы включения с общей базой.
10. Объясните модель Эберса-Молла. Как получают уравнения для токов эмиттера, базы и коллектора?

Лабораторная работа № 4. Исследование статических характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Цель работы: изучение принципа работы и приобретение навыков экспериментального исследования ВАХ биполярного полупроводниковых транзисторов.

В транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, имеет место усиление не только по напряжению, но и по току.

Входная характеристика:

Используя выражение (3.7) и учитывая, что

$$U_{ЭБ} = -U_{БЭ},$$

$$U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ} \rightarrow U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ},$$

получим

$$I_B = \frac{1 - \alpha_N}{1 - \alpha_N \alpha_I} I_{Э0} \left[\exp\left(-\frac{U_{БЭ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] + \frac{1 - \alpha_I}{1 - \alpha_N \alpha_I} I_{К0} \left[\exp\left(\frac{U_{КЭ} - U_{БЭ}}{\phi_T}\right) - 1 \right].$$

Раскрывая скобки и объединяя $\left[\exp\left(-\frac{U_{БЭ}}{\phi_T}\right) - 1 \right]$, а также добавляя

и вычитая $\frac{1 - \alpha_I}{1 - \alpha_N \alpha_I} I_{К0} \exp\left(\frac{U_{КЭ}}{\phi_T}\right)$, получаем

$$I_B(U_{БЭ}) \Big|_{U_{КЭ}=\text{const}} = \left[\frac{1 - \alpha_N}{1 - \alpha_N \alpha_I} I_{Э0} + \frac{1 - \alpha_I}{1 - \alpha_N \alpha_I} I_{К0} \exp\frac{U_{КЭ}}{\phi_T} \right] \cdot \left[\exp\left(-\frac{U_{БЭ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] + \frac{1 - \alpha_I}{1 - \alpha_N \alpha_I} I_{К0} \left[\exp\frac{U_{КЭ}}{\phi_T} - 1 \right]. \quad (4.1)$$

Изменение $U_{КЭ}$ приводит не только к смещению входной характеристики вдоль оси токов (вертикально), но также и к изменению её наклона.

Выходная характеристика:

Из (3.7) выразим $\frac{1}{1 - \alpha_N \alpha_I} I_{Э0} \left(\exp\frac{U_{БЭ}}{\phi_T} - 1 \right)$:

$$\frac{I_{Э0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \left(\exp\frac{U_{БЭ}}{\phi_T} - 1 \right) = \frac{I_B}{1 - \alpha_N} - \frac{1 - \alpha_I}{1 - \alpha_N} \cdot \frac{I_{К0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \left(\exp\frac{U_{КБ}}{\phi_T} - 1 \right),$$

и подставим в (3.6):

$$I_K = \alpha_N \left[\frac{I_B}{1 - \alpha_N} - \frac{1 - \alpha_I}{1 - \alpha_N} \cdot \frac{I_{K0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \left(\exp \frac{U_{KB}}{\Phi_T} - 1 \right) \right] - \frac{I_{K0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \left(\exp \frac{U_{KB}}{\Phi_T} - 1 \right) =$$

$$= \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N} I_B - \left[\frac{\alpha_N (1 - \alpha_I)}{1 - \alpha_N} + 1 \right] \frac{I_{K0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \left(\exp \frac{U_{KB}}{\Phi_T} - 1 \right).$$

Делая замену

$$\beta_N = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N},$$

$$\frac{\alpha_N (1 - \alpha_I)}{1 - \alpha_N} + 1 = \frac{1 - \alpha_N \alpha_I}{1 - \alpha_N} = (1 + \beta_N)(1 - \alpha_N \alpha_I),$$

получим

$$I_K = \beta_N I_B - (1 + \beta_N) I_{K0} \left(\exp \frac{U_{KB}}{\Phi_T} - 1 \right).$$

Учитывая, что $U_{KB} = U_{KЭ} - U_{БЭ}$, найдём $U_{БЭ} = f(I_B, U_{KЭ})$ из входной характеристики:

$$U_{БЭ}(I_B, U_{KЭ}) = -\Phi_T \ln \left[\frac{(1 - \alpha_N \alpha_I) I_B + (1 - \alpha_N) I_{Э0} + (1 - \alpha_I) I_{K0}}{(1 - \alpha_N) I_{Э0} + (1 - \alpha_I) I_{K0} \exp \frac{U_{KЭ}}{\Phi_T}} \right].$$

Подставляя это выражение в ток коллектора, получаем характеристику:

$$I_K(U_{KЭ}) \Big|_{I_B = \text{const}} = \beta_N I_B - (1 + \beta_N) I_{K0} \left[\exp \left(\frac{U_{KЭ} - U_{БЭ}(I_B, U_{KЭ})}{\Phi_T} \right) - 1 \right]. \quad (4.2)$$

Это выражение определяет семейство выходных ВАХ (рис 4.1, а) транзистора с ОЭ (зависимости I_K от $U_{KЭ}$ при $I_B = \text{const}$). Множитель перед током I_B — коэффициент усиления по току транзистора с ОЭ, он называется **коэффициентом передачи тока базы** $\beta_N = \alpha_N / (1 - \alpha_N)$. У изготавливаемых промышленностью транзисторов типичные значения α_N лежат в диапазоне от 0,9 до 0,995, что соответствует β_N от 9 до 200.

Коэффициент усиления по мощности транзистора с ОЭ может быть значительным, так как имеется усиление и по току, и по напряжению, поэтому в большинстве усилительных каскадов используется транзистор с ОЭ.

Семейство входных характеристик транзистора с ОЭ (рисунок 4.1, б) представляет собой зависимость $I_B(U_{БЭ})$ при постоянном $U_{KЭ}$. Входное сопротивление транзистора с ОЭ больше входного

сопротивления транзистора с ОБ в (β_N+1) раз, а выходное – в (β_N+1) раз меньше.

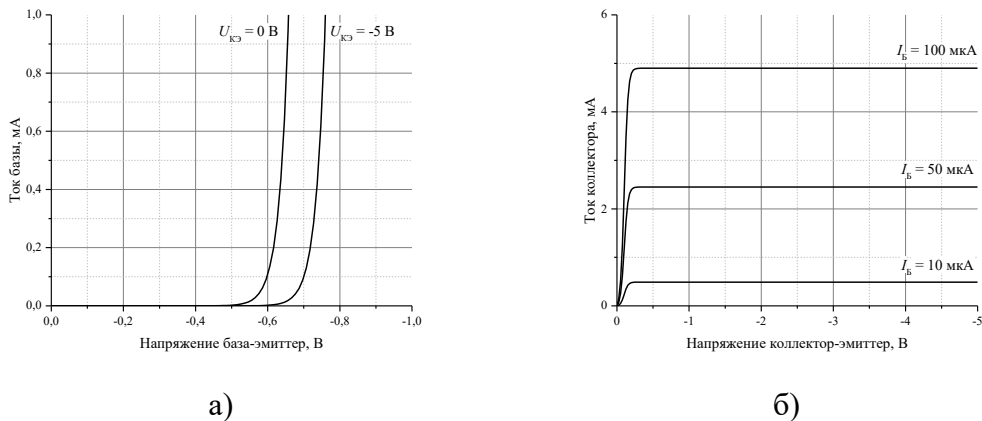


Рис. 4.1. Входная (а) и выходная (б) ВАХ транзистора в ОЭ

При домашней подготовке необходимо изучить характеристики транзистора при различных схемах включения, рассмотреть особенности работы реальных транзисторов.

Предварительное расчетное задание

1. Пользуясь параметрами транзистора, рассчитанными при подготовке к работе № 3, рассчитайте коэффициент передачи тока базы β_N .
2. Постройте на основе тех же данных входную ВАХ транзистора с ОЭ при обратном смещении на коллекторном переходе (напряжение $U_{КЭ} = -5$ В) и выходные ВАХ при токе базы $I_B = 10$ мкА; 20 мкА; 50 мкА. Также на отдельном графике постройте выходную ВАХ при токе базы равном 0 А.

Рабочее задание

1. Получить у преподавателя транзистор.
2. Записать в рабочий журнал тип транзистора и материал, из которого он сделан.
3. Подключить транзистор в соответствии со схемой, указанной на рисунке 4.2 для рnp-транзистора или указанной на рисунке 4.3 для npn-транзистора.

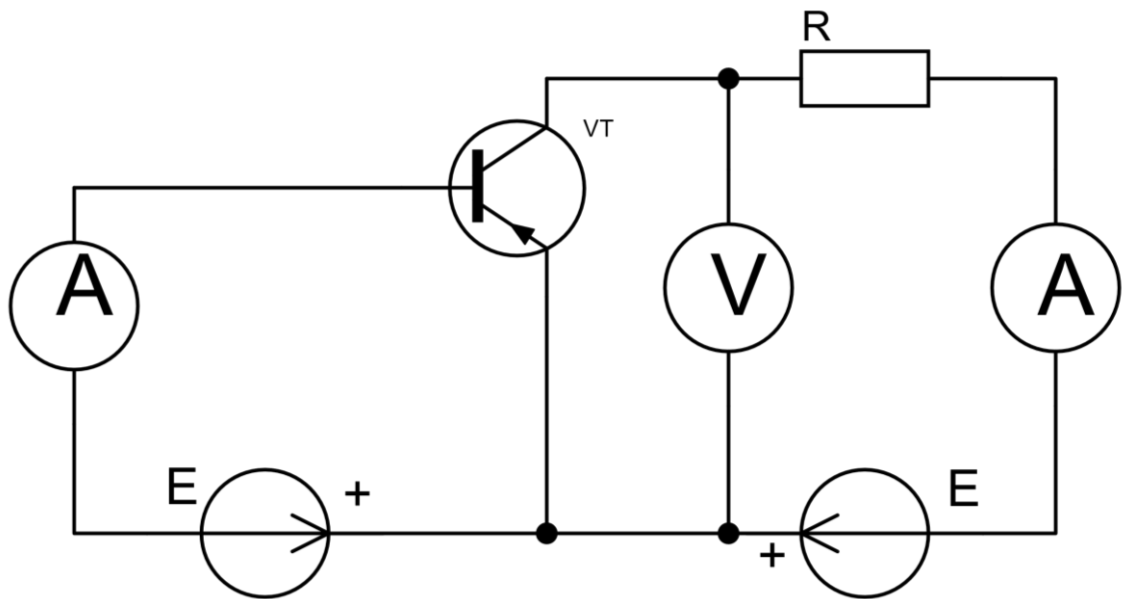


Рис. 4.2. Схема включения биполярного ррп-транзистора по схеме с общим эмиттером

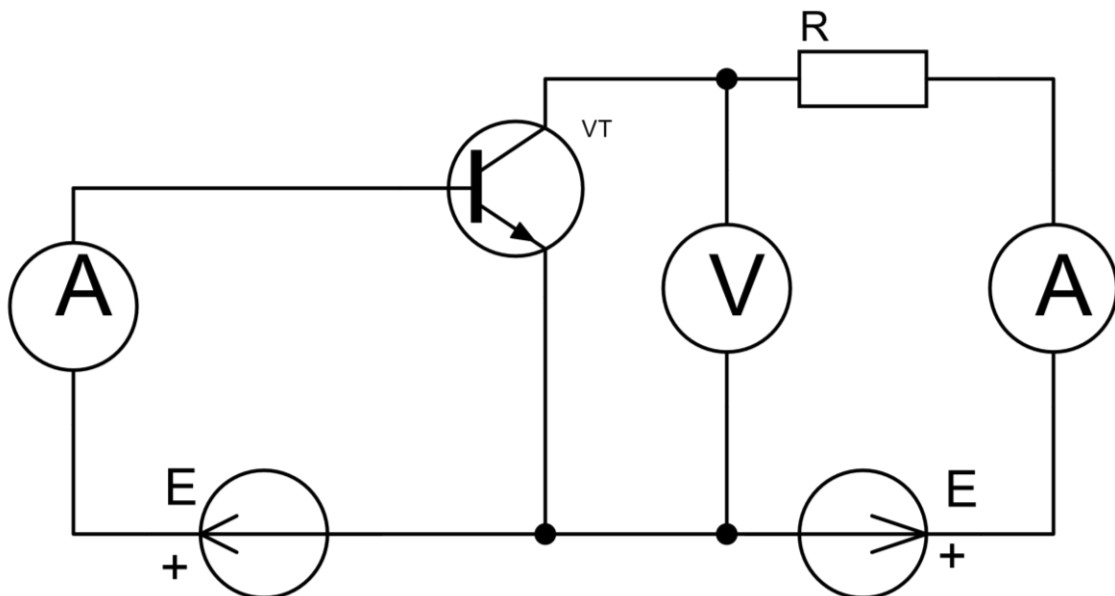


Рис. 4.3. Схема включения биполярного ррп-транзистора по схеме с общим эмиттером

4. Для измерения выходной характеристики установить ток базы равный 0.2 мА.
5. Варьируя напряжение на коллекторе в диапазоне от 0 до -2.5 В, измерить ток коллектора.
6. Повторить измерения выходной ВАХ для значения тока базы по указанию преподавателя (не более 1 мА).

Анализ результатов измерений

1. Рассчитайте значения выходного сопротивления транзистора в схеме с общим эмиттером $r_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{КЭ}} / \Delta I_{\text{К}}$ на различных участках ВАХ (в области

насыщения, активной области и промежуточной) при различных значениях отпирающего тока базы.

2. Постройте зависимость коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером β_N от тока базы и тока коллектора.

3. Сравните экспериментально полученные вольт-амперные характеристики транзистора, включенного с общим эмиттером, с рассчитанными, объясните различия.

Указания к отчету

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист с названием работы, ф.и.о. студента и номер группы;
2. Расчет предварительного задания;
3. Схему измерения;
4. Таблицы экспериментальных данных и графики ВАХ;
5. Выводы, сделанные по результатам измерения.

Контрольные вопросы

1. Объясните составляющие базового тока биполярного транзистора.
2. Нарисуйте схему включения биполярного транзистора с общим эмиттером. Нарисуйте для неё входные и выходные характеристики, поясните знаки токов и напряжений.
3. Каковы возможные причины появления различий в расчетных и экспериментальных характеристиках транзистора?
4. Как определить на характеристиках, снятых в схеме с общим эмиттером, границы активной области, области насыщения и области отсечки?
5. Расскажите об усилении тока, напряжения и мощности для схемы включения с общим эмиттером.
6. Как определить на характеристиках, снятых в схемах с общим эмиттером, границы активной области, области насыщения и области отсечки?
7. В чем основные различия статистических характеристик транзистора, включенного в схеме с общей базой от транзистора, включенного в схеме с общим эмиттером?
8. Поясните, в чём заключается эффект Эрли.
9. Почему усилительные каскады с транзистором в схеме с общим эмиттером используются значительно чаще, чем каскады с транзистором в схеме с общей базой?

Лабораторная работа № 5. Исследование статических характеристик полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом

Цель работы: изучение принципа работы и приобретение навыков экспериментального исследования ВАХ полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом.

Полевые транзисторы – униполярные полупроводниковые приборы, в которых ток переносится носителями заряда одного знака, а принцип работы состоит в изменении сопротивления проводящей области (**канала**) при приложении поперечного напряжения.

В полевом транзисторе с **управляющим *pn*-переходом (ПТУП)** сопротивление канала изменяется за счет расширения области пространственного заряда (ОПЗ) *pn*-перехода при приложении к нему обратного напряжения. На рисунке 5.1 показаны условные обозначения ПТУП-транзисторов и структура *n*-канального ПТУП.

Концентрация легирующей примеси в **затворных** областях выше, чем в области канала, поэтому ОПЗ будет распространяться главным образом в канал. Если напряжение между **стоком** и **истоком** $U_{си} = 0$, то ОПЗ будет перекрывать канал равномерно по всей длине. Напряжение на затворе, при котором ОПЗ *pn*-переходов сомкнутся, перекрыв путь для протекания тока между стоком и истоком, называется **напряжением отсечки** $U_{отс}$.

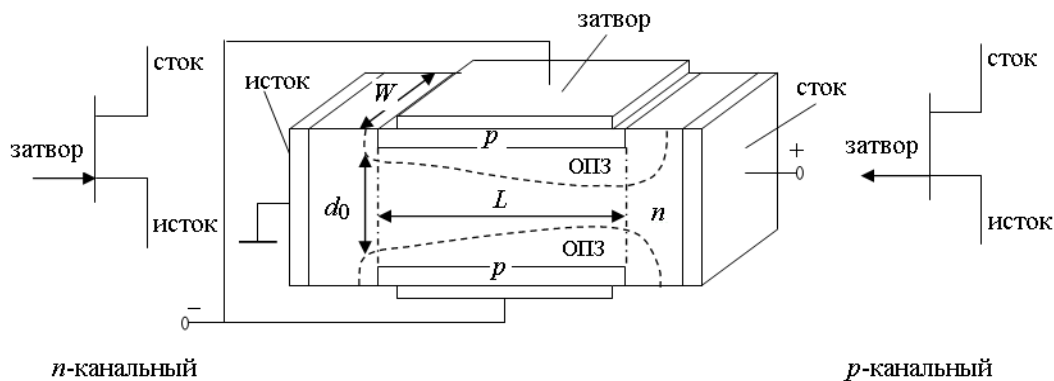


Рис. 5.1. Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом

Приравняв ширину ОПЗ $W_{ОПЗ}$ к половине толщины канала без приложения напряжения ($d_0/2$), и учитывая, что $N_d \ll N_a$ (для *n*-канального ПТУП), найдем напряжение отсечки:

$$U_{отс} = \frac{qN_d}{8\epsilon_r\epsilon_0} d_0^2 - \varphi_k \quad (5.1)$$

При подаче напряжения между стоком и истоком обратное напряжение, приложенное к *pn*-переходу в области стока, равно сумме приложенных напряжений $U_{зс} = U_{зи} + U_{си}$ (здесь и далее абсолютная величина $U_{зи}$ и $U_{си}$), поэтому канал перекрывается неравномерно,

сужаясь по направлению к стоку. Когда сумма напряжений $U_{зи} + U_{си}$ достигнет напряжения отсечки $U_{отс}$, канал перекроется областью пространственного заряда, тем не менее, ток между стоком и истоком будет течь, поскольку электрическое поле, возникшее между стоком и истоком, перебрасывает носители заряда через ОПЗ.

Для ПТУП рассматривают выходные (рисунок 5.2, а) ВАХ (выходом является сток) и передаточные (рисунок 5.2, б) ВАХ (зависимости тока выхода от напряжения на управляющем электроде – затворе). По характеру передаточной характеристики полевой транзистор с управляющим pn -переходом является **нормально открытым прибором**, то есть ток стока может протекать при приложении напряжения сток-исток в отсутствие напряжения затвор-исток.

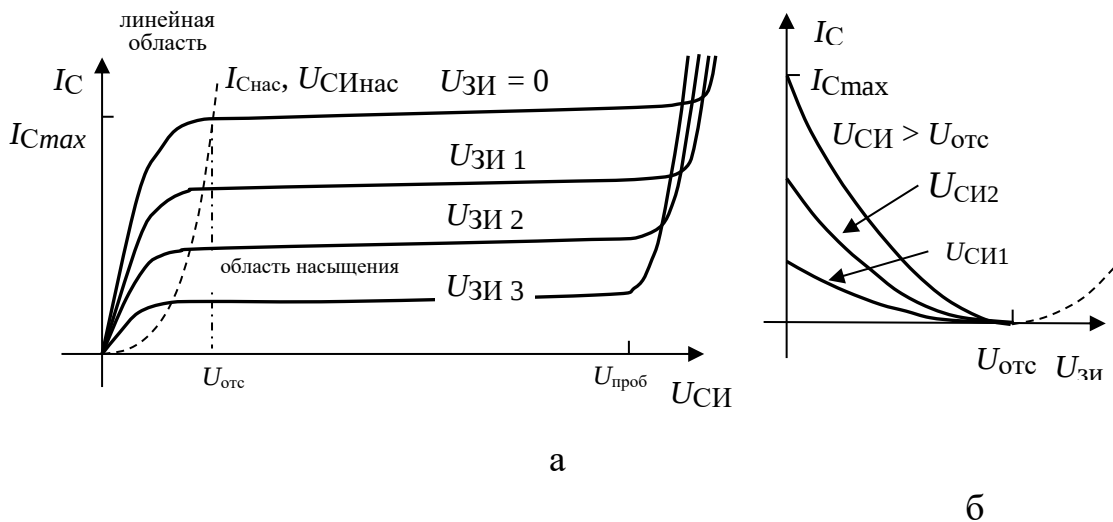


Рис. 5.2. Выходные (а) и передаточные (б) ВАХ ПТУП

При малых напряжениях на стоке $U_{си} \ll U_{отс}$ форма канала практически не изменяется, транзистор представляет собой резистор, сопротивление которого зависит от напряжения на затворе:

$$R = \rho L / (W \cdot d), \quad (5.2)$$

где ρ – удельное сопротивление, Ом·см;

L – длина канала, см;

W – ширина канала, см;

d – толщина канала, зависящая от $U_{зи}$ и $U_{си}$, см.

Выходная ВАХ представляет собой кривые, которые на двух участках (линейная область и область насыщения) можно моделировать прямыми линиями. В линейной области наклон прямой зависит от напряжения на затворе: с увеличением $U_{зи}$ сопротивление канала растет, т.к. канал перекрывается увеличивающейся ОПЗ переходов.

По мере увеличения напряжения на стоке, сечение канала уменьшается возле стока. Сопротивление канала увеличивается, рост тока

замедляется. При $U_{зи} + U_{си} = U_{отс}$ канал перекрывается ОПЗ, рост тока прекращается (в идеале), наступает **насыщение ВАХ**.

Для двух областей ПТУП (**линейной** и **насыщения**) вольт-амперная характеристика моделируются формулами:

$$I_C(U_{си})|_{U_{зи}=const} = \begin{cases} \frac{1}{R_{к0}} \cdot \left(U_{си} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(\varphi_k + U_{зи} + U_{си})^{3/2} - (\varphi_k + U_{зи})^{3/2}}{(\varphi_k + U_{отс})^{1/2}} \right), & |U_{зи}| + |U_{си}| < |U_{отс}|, \\ I_{C_{max}} \cdot \left(1 - 3 \cdot \frac{\varphi_k + U_{зи}}{\varphi_k + U_{отс}} + 2 \cdot \left(\frac{\varphi_k + U_{зи}}{\varphi_k + U_{отс}} \right)^{3/2} \right), & |U_{зи}| + |U_{си}| \geq |U_{отс}|, \end{cases} \quad (5.3)$$

где $R_{к0}$ – сопротивление полностью открытого канала. Зависимости $I_C(U_{си})$ в линейной области представляют собой кривые параболического типа с экстремумом ($I_{C_{нас}}$) при $U_{зи} + U_{си} = U_{отс}$. После достижения насыщения ток стока можно считать постоянным, равным $I_{C_{нас}}$.

Ток стока насыщения будет максимальным при $U_{зи} = 0$. Максимальный ток стока можно определить формуле:

$$I_{C_{max}} = \frac{U_{отс} + \varphi_k}{3R_0}. \quad (5.4)$$

Тогда ток стока насыщения:

$$I_C(U_{зи})|_{U_{си}=const} = \begin{cases} I_{C_{max}} \cdot \left(1 - \frac{\varphi_k + U_{зи}}{\varphi_k + U_{отс}} \right)^2, & |U_{зи}| < |U_{отс}| \\ 0, & |U_{зи}| \geq |U_{отс}|. \end{cases} \quad (5.5)$$

По этой формуле рассчитывается передаточная характеристика.

Одним из основных параметров полевого транзистора, характеризующих его **усилительные свойства**, является **крутизна передаточной характеристики**, определяемая как $S = dI_C/dU_{зи}$ при $U_{си} = const$. Крутизна в области насыщения ВАХ (используемой в усилительном режиме работы) равна:

$$S \approx -\frac{2I_{C_{max}}}{U_{отс}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right). \quad (5.6)$$

Вторым важным параметром полевого транзистора считается **проводимость канала** в линейной области ВАХ, определяемая как $g_k = dI_C/dU_{си}$ при $U_{зи} = const$.

При домашней подготовке необходимо изучить принцип работы ПТУП.

Предварительное расчетное задание

1. Проведите расчет основных параметров полевого транзистора: $U_{отс}$, $R_{к0}$, I_{Cmax} , S ($U_{зи} = 0$).
2. Рассчитайте и постройте выходные ВАХ при $U_{зи} = 0, 0,2U_{отс}, 0,5U_{отс}$ и $0,8U_{отс}$ при напряжении сток-исток от 0 до $2U_{отс}$.
3. Рассчитайте и постройте передаточную ВАХ для области насыщения при напряжении затвор-исток от 0 до $1,5U_{отс}$.

Данные к расчету

Материал – кремний, тип ПТУП – n -канальный.

Концентрация атомов примеси в подзатворной области	$N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$
Концентрация атомов примеси в канале	$N_d = N_{ж} \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, где $N_{ж}$ – номер фамилии студента в журнале группы
Толщина канала	$d_0 = 1 \text{ мкм}$
Длина канала	$L = 20 \text{ мкм}$
Ширина канала	$W = 500 \text{ мкм}$
Подвижность электронов в канале	$\mu_n = 1200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

Рабочее задание

1. Получить у преподавателя транзистор.
2. Записать марку транзистора, пользуясь справочником, записать материал, из которого он сделан.
3. Собрать схему в соответствии с рисунком 5.3 для p -канального транзистора или в соответствии с рисунком 5.4 для n -канального транзистора.

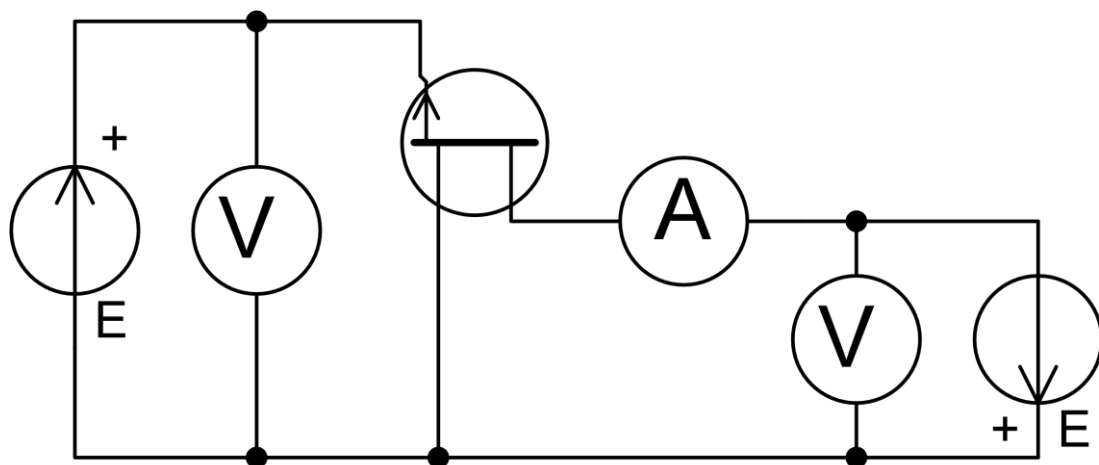


Рис. 5.3. Схема включения полевого p -канального транзистора с управляющим pn -переходом

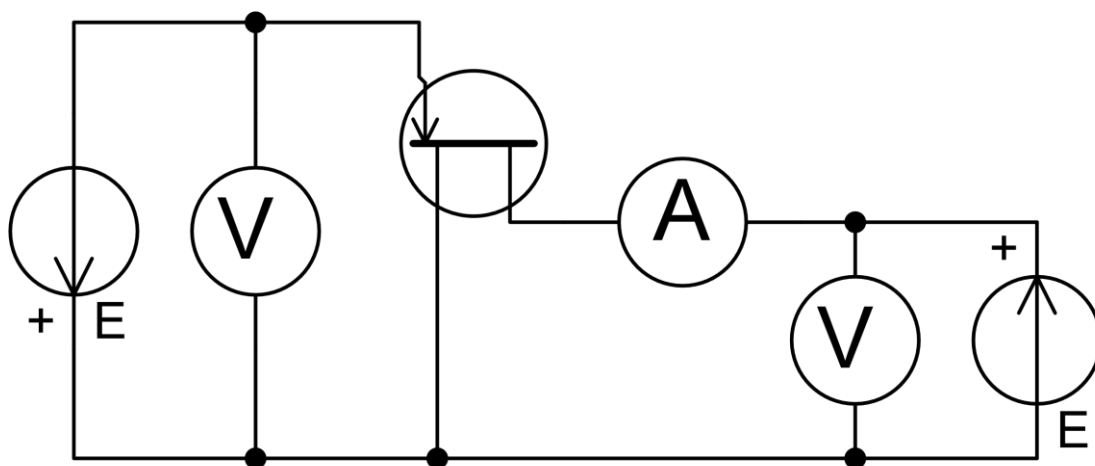


Рис. 5.4. Схема включения полевого п-канального транзистора с управляющим *pn*-переходом

4. Установить напряжение на затворе 0 В, а затем измерять ток стока, меняя напряжение сток-исток в диапазоне от 0 до 4 В.
5. Повторить пункт 3 для напряжений на затворе по указанию преподавателя.

Анализ результатов измерений

1. Используя выходную характеристику транзистора, снятую при $U_{зи} = 0$, рассчитайте сопротивление полностью открытого канала $R_{к0}$.
2. Используя данные ВАХ, рассчитайте и постройте передаточную характеристику, зафиксировав напряжение сток-исток в области насыщения.
3. Рассчитайте для выходной ВАХ дифференциальное сопротивление в трёх точках: напряжение сток-исток близко к 0, в области перегиба ВАХ, а также в области насыщения.
4. Используя передаточную характеристику, постройте зависимость крутизны передаточной характеристики $S = \Delta I_C / \Delta U_{зи}$ от напряжения на затвор-истоке.
5. Сравните экспериментально полученные ВАХ полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом с рассчитанными, объясните различия.

Указания к отчету

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист с названием работы, ф.и.о. студента и номер группы;
2. Расчет предварительного задания;
3. Схему измерения;
4. Таблицы экспериментальных данных и графики ВАХ;
5. Выводы, сделанные по результатам измерения.

Контрольные вопросы

1. Как зависит ток стока полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом от напряжения затвор-исток?
2. Как зависит ток стока полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом от напряжения сток-исток?
3. Почему при достижении напряжения сток-исток величины напряжения отсечки в случае перекрытия канала областями пространственного заряда ток стока продолжает протекать?
4. Что характеризует крутизна полевого транзистора?
5. Как изменится вид выходных ВАХ полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом, если возрастет длина канала, а все остальные параметры останутся неизменными? если возрастет ширина канала, а все остальные параметры останутся неизменными?
6. От каких конструктивно-технологических параметров зависит крутизна полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом?

Лабораторная работа № 6. Исследование статических характеристик полевого транзистора с МДП – структурой

Цель работы: изучение принципа работы и приобретение навыков экспериментального исследования ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом.

Полевые транзисторы с изолированным затвором относятся к униполярным полупроводниковым приборам, принцип работы которых основан на изменении электрического сопротивления поверхностной области полупроводника вследствие **эффекта поля**. Основу прибора составляет структура **металл-диэлектрик-полупроводник (МДП)**.

Различают МДП-транзисторы с **индуцированным** (рисунок 6.1, а) и **встроенным** (рисунок 6.1, б) каналом. В МДП-транзисторе с индуцированным каналом сток и исток разделены областью с другим типом проводимости (частью подложки). При приложении напряжения к затвору в подзатворной области вследствие эффекта поля меняется тип проводимости, и образуется канал. По характеру ВАХ это **нормально закрытый прибор** (при отсутствии напряжения между затвором и истоком ток между стоком и истоком не течет при приложении напряжения сток-исток).

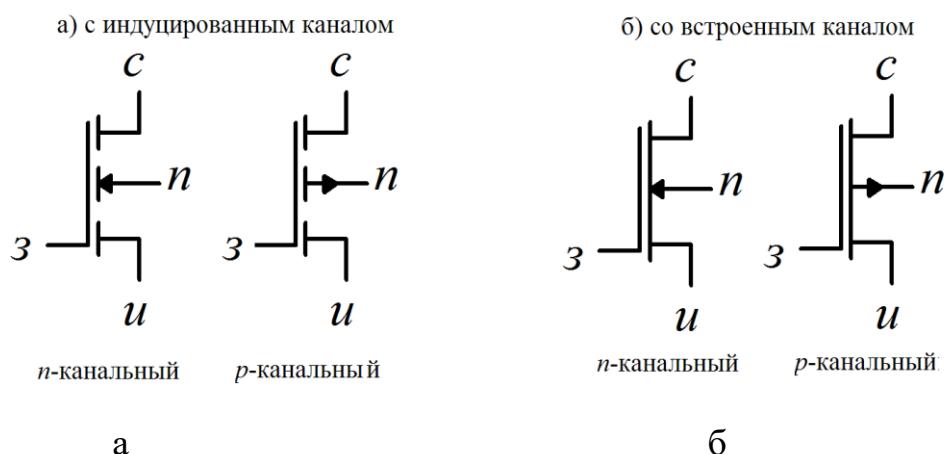


Рис. 6.1. Условные обозначения МДП-транзисторов

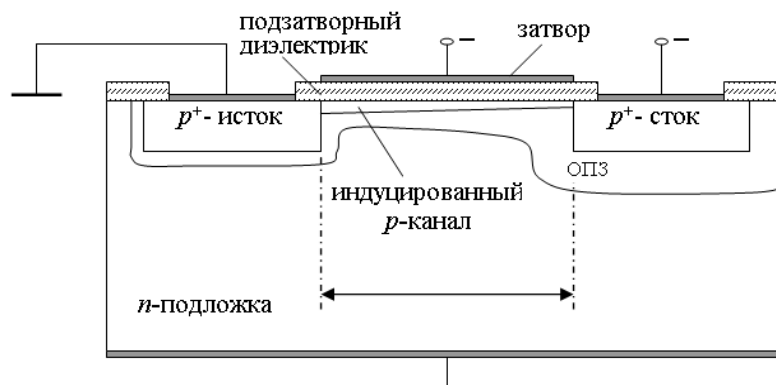


Рис. 6.2. Структура МДП-транзистора с индуцированным p -каналом

В МДП-транзисторе со встроенным каналом между стоком и истоком создана область с тем же типом проводимости – канал, сопротивление которого меняется при приложении напряжения к затвору. Это **нормально открытый прибор** (ток между стоком и истоком может протекать при отсутствии напряжения затвор-исток, но наличии напряжения сток-исток).

Наиболее широко используются МДП-транзисторы с индуцированным каналом. На них построены почти все современные интегральные схемы. Мы будем рассматривать МДП-транзистор с индуцированным p -каналом (рисунок 6.2).

В полупроводнике n -типа созданы сильнолегированные области p -типа проводимости – исток и сток (расстояние между ними – длина канала L). Над областью образования канала расположен затвор, отделенный от полупроводника диэлектриком (в кремниевых транзисторах в качестве диэлектрика используют обычно оксид кремния SiO_2 , в этом случае прибор называют МОП-транзистором).

При нулевом смещении между затвором и истоком ток между стоком и истоком будет равен току обратно смещенного pn -перехода сток – подложка. Если на затвор подан отрицательный потенциал относительно истока, электроны под действием электрического поля оттесняются от поверхности, а дырки – притягиваются. Таким образом, происходит смена проводимости приповерхностного слоя с n -типа на p -тип – **инверсия типа проводимости**. Между истоком и стоком возникает канал с тем же типом основных носителей, и при приложении напряжения $U_{си}$ будет течь ток I_c . Напряжение на затворе $U_{зи}$, при котором меняется тип электропроводности полупроводника под затвором, называют **пороговым** $U_{пор}$.

Энергетические зонные диаграммы полупроводника под затвором МДП-структуры приведены на рисунке 6.3. При отрицательном смещении на затворе энергетические зоны будут искривляться вверх тем сильнее, чем выше смещение.

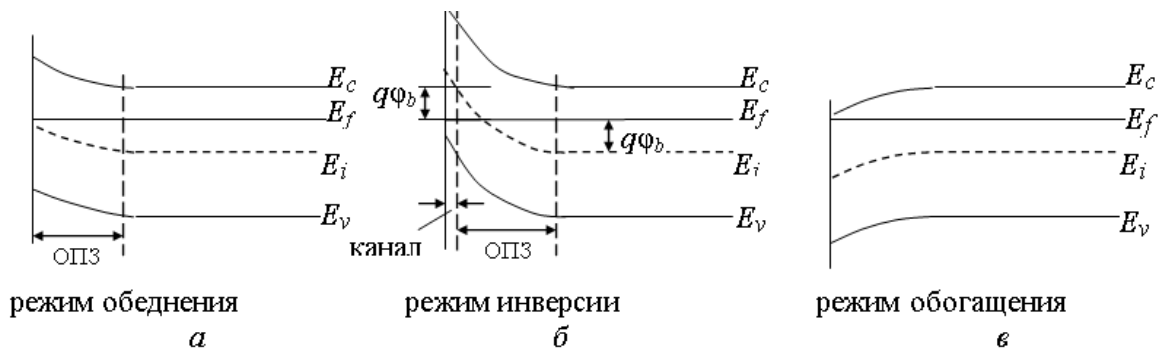


Рис. 6.3. Зонные диаграммы полупроводника *n*-типа под затвором МДП-структуры

Концентрация электронов вблизи поверхности уменьшается, а концентрация дырок – возрастает (**режим обеднения**). Когда в приповерхностном слое концентрация неосновных носителей заряда превысит концентрацию основных (в данном случае электронов) произойдет инверсия проводимости. Но для того, чтобы проводящий канал был эффективен, концентрация дырок должна превысить равновесную концентрацию электронов в объеме полупроводника n_{p0} (рисунок 6.3, б). Напряжение затвор-исток, соответствующее этому граничному режиму – пороговое. При $U_{зи} > U_{пор}$ существует индуцированный канал (это **режим сильной инверсии**). При положительном смещении на затвор-истоке энергетические зоны изгибаются вниз, концентрация электронов у поверхности возрастает (рисунок 6.3, в). Это **режим обогащения** (в SiO_2 существует положительный заряд поверхностных состояний, поэтому при $U_{зи} = 0$ будет режим обогащения).

Пороговое напряжение:

$$U_{пор} = \varphi_{S0} + (Q_{пов} + Q_{ОПЗ})/C_d, \quad (6.1)$$

где φ_{S0} – поверхностный потенциал при граничных условиях сильной инверсии,

$$\varphi_{S0} = 2\varphi_B = 2\varphi_T \ln(N_d/n_i), \quad (6.2)$$

$Q_{пов}$ – заряд поверхностных состояний диэлектрика, Кл/см²;

$Q_{ОПЗ} = q \cdot N_d \cdot W_{ОПЗ}$ – заряд ОПЗ, Кл/см²;

$$W_{ОПЗ} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 \varphi_{S0}}{qN_d}} \text{ – ширина ОПЗ, см;}$$

$C_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{t_d}$ – удельная емкость МДП-структуры, представляющей собой плоский конденсатор, Ф/см²;

ε_d и t_d – относительная диэлектрическая проницаемость и толщина подзатворного диэлектрика соответственно, см.

При протекании тока по каналу потенциал канала по мере приближения к стоку становится более отрицательным, поэтому разность потенциалов между затвором и полупроводником, индуцирующая подвижный заряд в канале, уменьшается по мере приближения к стоку. Толщина канала возле стока уменьшается, а ширина ОПЗ – растет. Из-за этого с ростом $U_{си}$ наблюдается замедление роста тока стока I_c . При $U_{си} = U_{зи} - U_{пор}$ толщина канала у стока становится равной нулю, ток стока достигает насыщения (переход от крутого участка ВАХ к

пологую). Передаточные ВАХ МДП-транзистора показаны на рисунке 6.4, а, выходные – на рисунке 6.4, б.

Передаточная характеристика МДП-транзистора описывается выражением:

$$I_C(U_{ЗИ})|_{U_{СИ}=const} = \begin{cases} 0, & |U_{ЗИ}| \leq |U_{пор}|, \\ \frac{1}{2}b \cdot (U_{ЗИ} - U_{пор})^2, & |U_{ЗИ}| > |U_{пор}|, \end{cases} \quad (6.3)$$

где $b = \mu_s C_d \frac{W}{L}$ – удельная крутизна, А/В²;

μ_s – подвижность носителей заряда в канале, см²/(В·с);

W, L – ширина и длина канала соответственно, см.

Выходная вольт-амперная характеристика описывается выражением:

$$I_C(U_{СИ})|_{U_{ЗИ}=const} = \begin{cases} b \cdot \left[(U_{ЗИ} - U_{пор})U_{СИ} - \frac{1}{2}U_{СИ}^2 \right], & |U_{СИ}| \leq |U_{ЗИ}| - |U_{пор}|, \\ \frac{1}{2}b \cdot (U_{ЗИ} - U_{пор})^2, & |U_{СИ}| > |U_{ЗИ}| - |U_{пор}|, \end{cases} \quad (6.4)$$

Здесь ток стока I_C не зависит явно от $U_{СИ}$ в пологой области, но удельная крутизна b увеличивается с ростом $U_{СИ}$ за счет уменьшения длины канала.

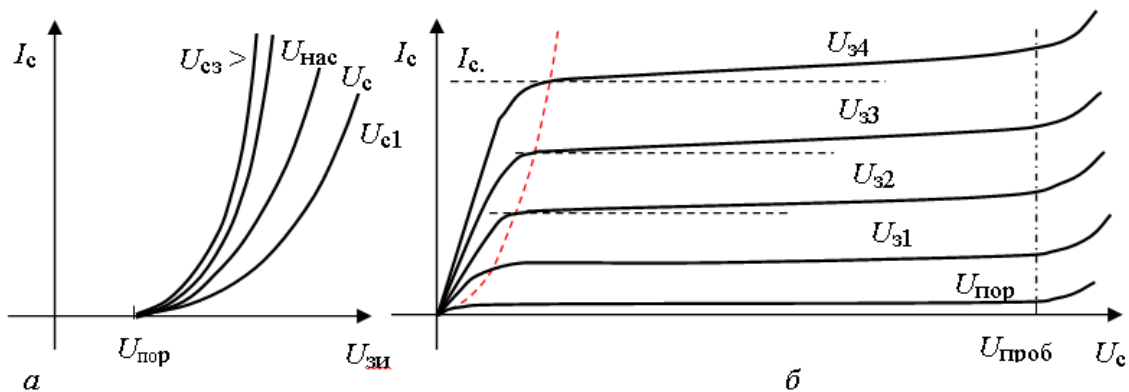


Рис. 6.4. Передаточные (а) и выходные (б) ВАХ p -канального МДП-транзистора

Крутизна передаточной характеристики ($S = dI_C/dU_{ЗИ}$ при $U_{СИ} = const$) в пологой области ВАХ:

$$S = b \cdot (U_{ЗИ} - U_{пор}). \quad (6.5)$$

Зависимость крутизны S от выходного тока стока I_C (в пологой области):

$$S = \sqrt{2b \cdot I_C}.$$

На подложку относительно истока может быть подано положительное напряжение $U_{\text{ПИ}}$. Тогда обратное смещение, приложенное к ОПЗ, возрастает до $\varphi_{s0} + U_{\text{ПИ}}$. Соответственно возрастут ширина ОПЗ

$$W_{\text{ОПЗ}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (\varphi_{s0} + U_{\text{ПИ}})}{qN_d}}, \text{ ее заряд и пороговое напряжение.}$$

При домашней подготовке необходимо изучить принцип работы МДП-транзистора.

Предварительное расчетное задание

1. Провести расчет основных параметров МДП транзистора: $U_{\text{пор}}$, C_d , b .
2. Рассчитать и построить выходные ВАХ при $U_{\text{ЗИ}} = U_{\text{пор}}$, $1,5U_{\text{пор}}$, $2U_{\text{пор}}$ и передаточную ВАХ для области насыщения.

Данные к расчету

Материал – кремний, тип МДП-транзистора – p -канальный.

Концентрация атомов примеси в подложке	$N_d = N_{\text{ж}} \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, где $N_{\text{ж}}$ – номер фамилии студента в журнале группы
Длина канала	$L = 10 \text{ мкм}$
Ширина канала	$W = 100 \text{ мкм}$
Толщина подзатворного диэлектрика	$t_d = 0,2 \text{ мкм}$
Подвижность дырок в канале	$\mu_s = 200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Удельный поверхностный заряд	$Q_{\text{пов}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$

Рабочее задание

1. Получить у преподавателя транзистор.
2. Записать марку транзистора, пользуясь справочником, записать материал, из которого он сделан.
3. Собрать схему в соответствии с рисунком 6.4 для n -канального транзистора или в соответствии с рисунком 6.5 для p -канального транзистора.

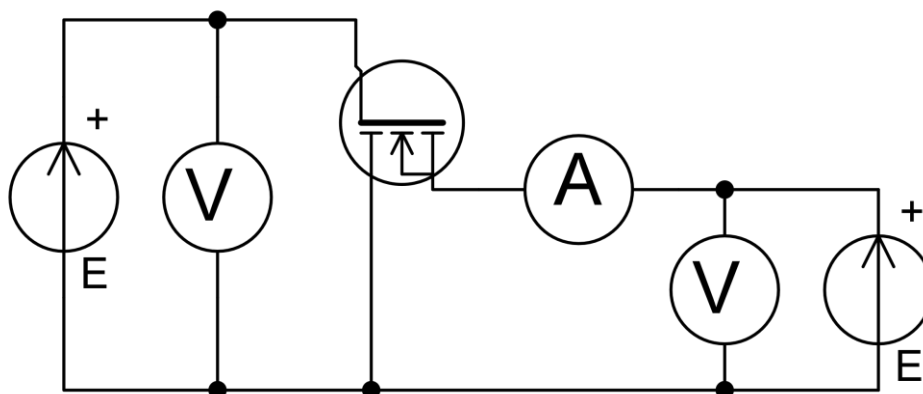


Рис. 6.4. Схема включения полевого п-канального транзистора с МДП-структурой

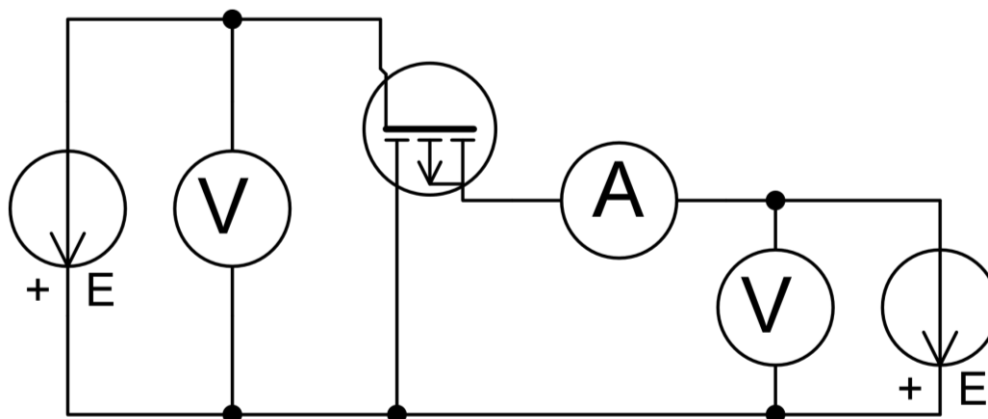


Рис. 6.5. Схема включения полевого р-канального транзистора с МДП-структурой

4. Установить напряжение на затворе 2 В, измерить ток стока, меняя напряжение сток-исток в диапазоне от 0 до 4 В.
5. Повторить пункт 3 для напряжений на затворе по указанию преподавателя.

Анализ результатов измерений

1. На выходной характеристике рассчитайте сопротивление канала (дифференциальное сопротивление) при трёх значениях напряжения сток-исток: в области малых напряжений (около 0), в области перегиба ВАХ, в области насыщения.
2. Используя выходную характеристику транзистора, снятую при максимальном $U_{зи}$, рассчитайте сопротивление открытого канала.
3. Из полученной выходной характеристики при фиксированном напряжении на сток-истоке в области насыщения постройте передаточную характеристику.
4. Перестройте передаточную характеристику, откладывая по оси ординат $I_C^{1/2}$. По продолжению линейного участка до пересечения с осью абсцисс найдите $U_{пор}$, а по наклону – удельную крутизну b .
5. Используя измерения передаточной характеристики, постройте зависимость крутизны передаточной характеристики от напряжения на затвор-истоке.
6. Сравните экспериментально полученные ВАХ МДП-транзистора с рассчитанными, объясните различия.

Указания к отчету

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист с названием работы, ф.и.о. студента и номер группы;
2. Расчет предварительного задания;
3. Схему измерения;

4. Таблицы экспериментальных данных и графики ВАХ.
5. Результаты анализа.

Контрольные вопросы

1. Что такое «режим обогащения», «режим обеднения» и «режим инверсии»?
2. Поясните процесс образования канала в МДП-транзисторе с индуцированным каналом. При каком условии происходит образование канала?
3. Объясните форму передаточной характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом.
4. Почему в правильно включенном МДП-транзисторе по мере приближения к стоку толщина канала уменьшается?
5. Почему в области насыщения выходных ВАХ при условии, что канал «оторвался» от стока, ток стока продолжает протекать?
6. Почему изменение потенциала подложки оказывает влияние на вид вольт-амперных характеристик МДП-транзистора?
7. Чем отличаются характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом от характеристик транзистора со встроенным каналом?
8. Как изменится крутизна МДП-транзистора с индуцированным каналом, если длина канала увеличится?
9. Как изменится крутизна МДП транзистора, если возрастет ширина канала?

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

На рисунке 7.1 представлено изображение лабораторного комплекса NI ELVIS. Внешнее устройство комплекса можно разделить на две части: 1 – передняя панель (рис. 7.2), 2 – рабочая область (рис. 7.3).

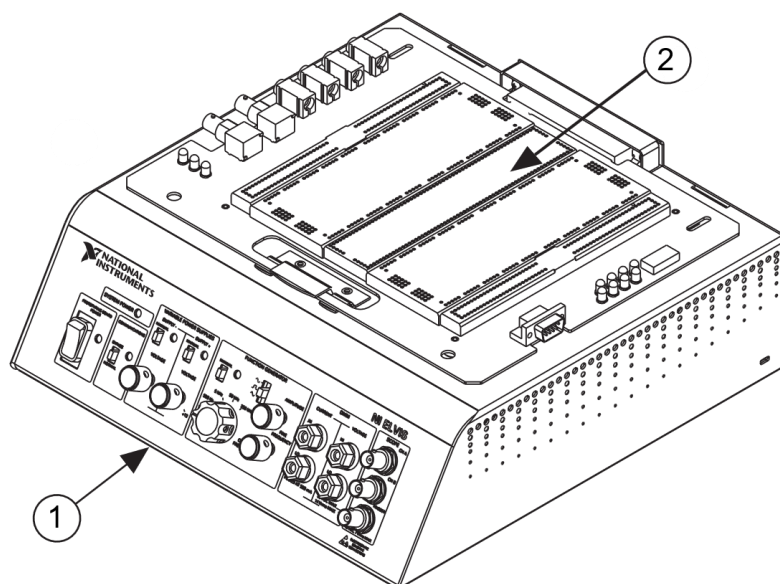


Рис. 7.1. Изображение лабораторного комплекса NI ELVIS

На рисунке 7.2 представлена передняя панель лабораторного комплекса, которая включает в себя:

- 1 – индикатор питания;
- 2 – переключатель питания рабочей области;
- 3 – переключатель системы передачи данных;
- 4 – внутренние регулируемые источники питания (от 0 до ± 12 В);
- 5 – генераторы переменного сигнала;
- 6 – контакты для подключения вольтметра и амперметра;
- 7 – разъемы осциллографа.

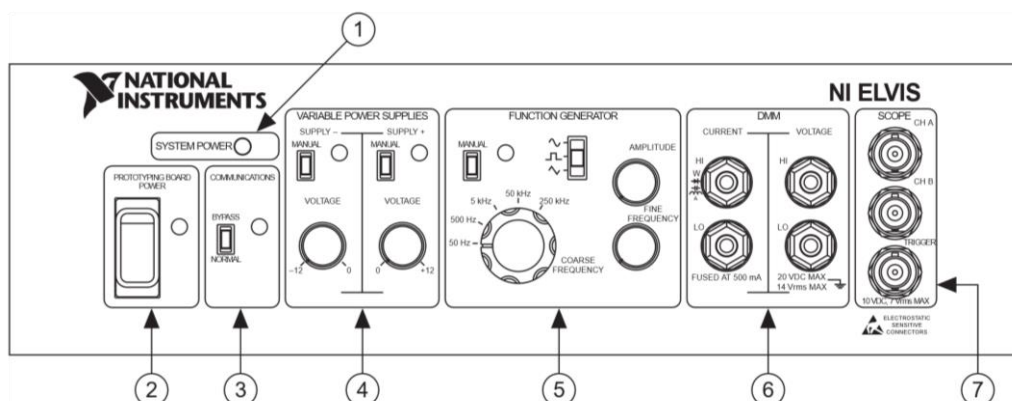
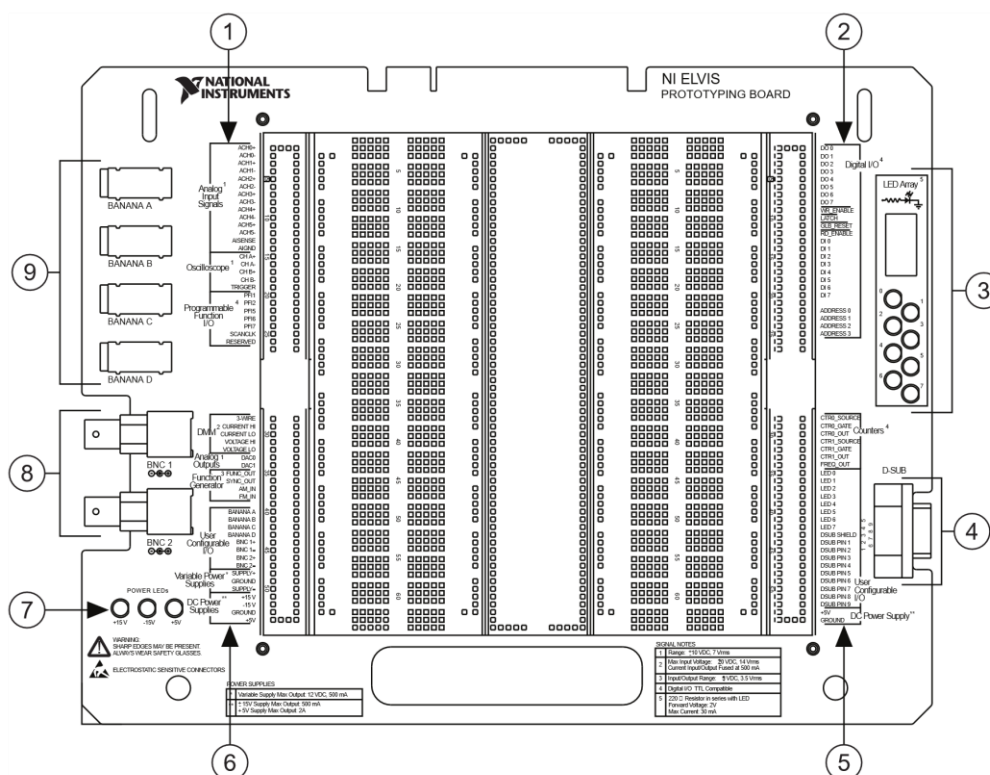


Рис. 7.2. Передняя панель лабораторного комплекса NI ELVIS

2 – строки сигналов;
3 – светодиодная матрица;
4 – разъем D-SUB;
5 – питание постоянного тока;
6 – подключение к внутренним источникам и внешним выводам;
7 – индикаторы питания;
8 – внешние выводы BNC;
9 – внешние выводы Banana Jack.



У лабораторного комплекса при включении переключателя 2 (рис.7.2) прямое соединение между устройствами передней панели с соответствующими контактами области 6 (рис.7.3) и внешних выводов 8 и 9 также к соответствующим контактам области 6 (рис.7.3).

50

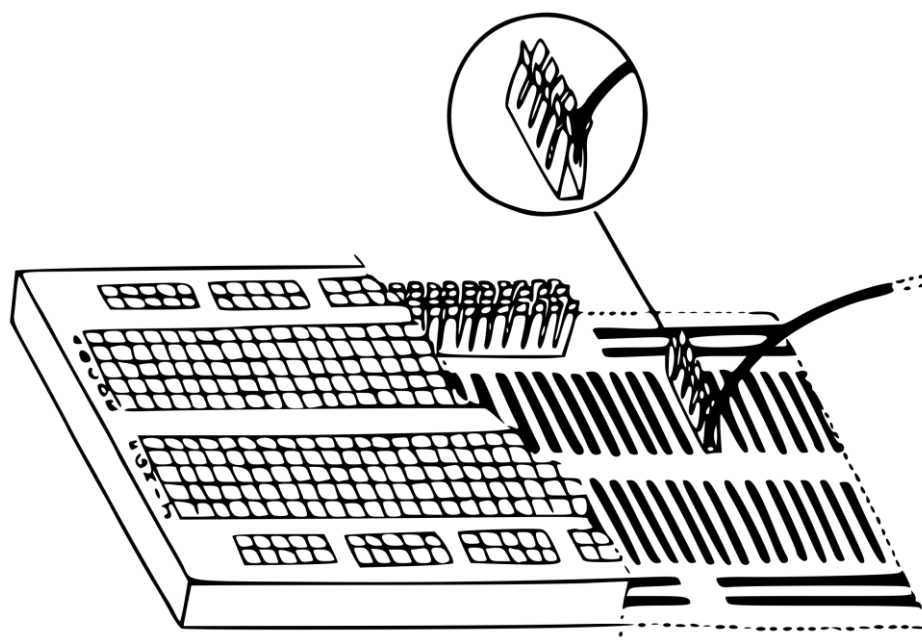


Рис. 7.4. Принцип соединения узлов в макетной плате

Макетная плата разделена на две области: рабочая область и шины. Шины располагаются с двух сторон от рабочей области и представлены как контакты, отмеченные полосами синего и красного цвета. Все контакты вдоль полосы соответствующего цвета соединены между собой.

В рабочей области макетной платы каждый контакт имеет буквенно-цифровую координату, при этом контакты соединены между собой по пять в рамках одной цифровой координаты. Например, контакты A1-E1 соединены между собой и не соединены ни с контактами F1-J1, ни с контактами A2-E2.

Для выполнения лабораторной работы №2 требуется нагревательная установка, изображенная на рисунке 7.5. Для включения нагревателя необходимо подключить сетевой кабель в сеть 220 В. Далее для увеличения температуры в нагревательной камере 1 следует нажать на кнопку 4, для уменьшения температуры на кнопку 3. Стоит обратить внимание, что стоит совершить долгое нажатие на выбранную кнопку для его регистрации. Для контроля температуры у нагревателя есть двухстрочный дисплей 2. На верхней строке отображается настоящая температура нагревательной камеры, на нижней выбранная при помощи кнопок.

Необходимо повышенное соблюдение техники безопасности при работе с нагревательной установкой.

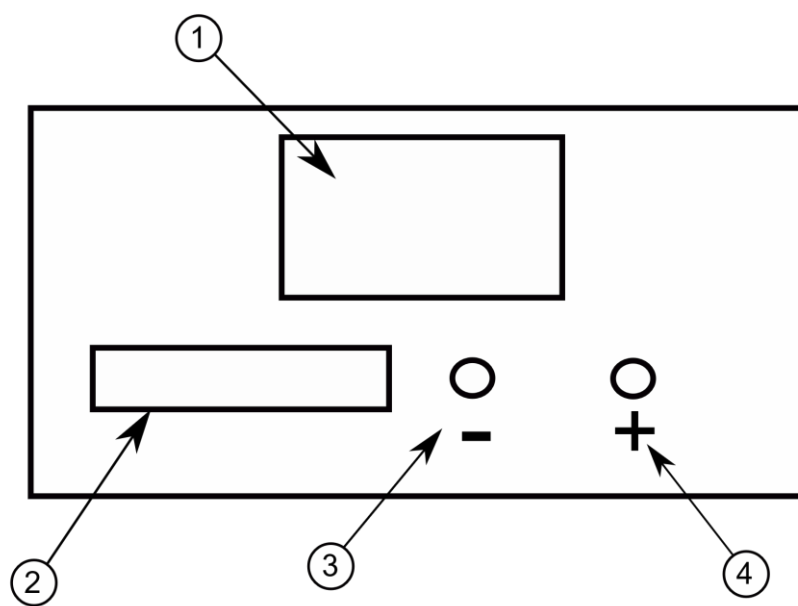


Рис. 7.5. Нагревательная установка (вид сверху)

Литература

1. Лабораторный комплекс для исследования характеристик полупроводниковых приборов NI ELVIS. Hardware User Manual / National Instruments Corporate Headquarters ©.
2. Твердотельная электроника: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/[Э.Н. Воронков, А.М. Гуляев, И.Н. Мирошникова, Н.А. Чарыков]. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 320 с.
3. Твердотельная электроника. Лабораторные работы: методическое пособие / Э.Н. Воронков, О.Б. Сарач, Н.А. Чарыков. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 28 с.
4. Гаврилин В.И., Горюнов Н.Н., Огнев А.Н., Попов И.А., Чарыков Н.А., Чирков В.Г. Полупроводниковые диоды Учебное пособие под ред. Н.А. Чарыкова. – М.: Издательство МЭИ, 1997.
5. Воронков Э.Н., Зенова Е.В. Полевые транзисторы/Учебное пособие М.: Издательство МЭИ. 2004. 60 с.
6. Огнев А.Н., Чарыков Н.А., Гаврилин В.И. Исследование статических характеристик полевого транзистора с управляющим р-п-переходом. Лабораторная работа №7. – М.: Издательство МЭИ, 1994.
7. Огнев А.Н., Чарыков Н.А., Гаврилин В.И. Исследование статических характеристик МДП транзистора с индуцированным каналом. Лабораторная работа №8. – М.: Издательство МЭИ, 1994.