

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Промышленная электроника»

Ю. А. Козусев, Н. А. Красовская

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине для студентов
специальности 1-53 01 07 «Информационные
технологии и управление в технических системах»
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2019

УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73
К59

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 5 от 03.12.2018 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *В. С. Захаренко*

Козусев, Ю. А.

К59 Электронные приборы : практикум по выполнению лаборатор. работ по одному. дисциплине для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» днев. формы обучения / Ю. А. Козусев, Н. А. Красовская. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 80 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-412-4.

Предназначен для закрепления знаний по дисциплине «Электронные приборы» путем экспериментального исследования параметров и характеристик дискретных полупроводниковых диодов, стабилитронов, биполярных и полевых транзисторов.

Для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» дневной формы обучения.

**УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73**

ISBN 978-985-535-412-4

© Козусев Ю. А., Красовская Н. А., 2019
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2019

Лабораторная работа № 1

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение основных свойств p – n -перехода, исследование вольт-амперных характеристик кремниевого и германиевого полупроводниковых диодов, определение параметров схем замещения диодов, исследование зависимости параметров диодов от режима работы.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основным элементом полупроводниковых диодов является p – n -переход, образованный в результате контакта двух областей полупроводника, обладающих разными типами электропроводности. Обычно концентрация примеси в одном из слоев значительно больше, чем концентрация примеси в другом слое – несимметричный p – n -переход. На рис. 1.1 приведена структура p – n -перехода между двумя слоями p - и n -типа, причем концентрация примеси N_a в p -слое больше, чем концентрация N_d в n -слое. При комнатной температуре атомы примеси ионизированы, поэтому $p_{p0} \gg n_{n0}$. Так как произведение концентраций подвижных носителей в примесном полупроводнике по закону действующих масс постоянно, то

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_a^*} \ll p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_d^*}.$$

Концентрация дырок p_{p0} в p -слое значительно больше, чем p_{n0} в n -слое, а концентрация электронов n_{n0} в n -слое значительно больше, чем n_{p0} в p -слое. Под действием градиента концентрации дырки диффундируют в n -слой, а электроны из n -слоя – в p -слой. В приграничной области p -слоя образуется нескомпенсированный отрицательный заряд ионизированных атомов-акцепторов, а в n -слое – положительный заряд атомов-доноров. Область образовавшегося пространственного заряда ионов примеси называется p – n -переходом. В области p – n -перехода концентрация подвижных носителей значительно меньше, чем в слоях полупроводника, это обедненная носителями область.

Пространственные заряды ионов примеси создают электрическое поле, препятствующее диффузии основных носителей и вызывающее дрейфовые токи неосновных носителей в противоположных токам диффузии направлениях. В изолированном полупроводнике плотность тока равна нулю, поэтому автоматически образуется поле такой величины, что диффузионные токи компенсируются дрейфовыми токами одноименных носителей. Такое состояние называется бальцмановским равновесием.

Через p - n -переход протекают четыре составляющих токов: $J_{p\text{диф}}$, $J_{n\text{диф}}$ – диффузионные составляющие, соответственно, дырочного и электронного тока; $J_{p\text{др}}$, $J_{n\text{др}}$ – дрейфовые составляющие дырочного и электронного тока, причем

$$J_{p\text{диф}} = -J_{p\text{др}}, \quad J_{n\text{диф}} = -J_{n\text{др}}.$$

Общая плотность тока:

$$j = -qD_p dp/dx + q\mu_p E + qD_n dn/dx + q\mu_n E = 0,$$

где p , n – концентрации основных носителей заряда; dp/dx , dn/dx – градиенты концентраций; μ_p , μ_n – подвижность; D_p , D_n – коэффициенты диффузии.

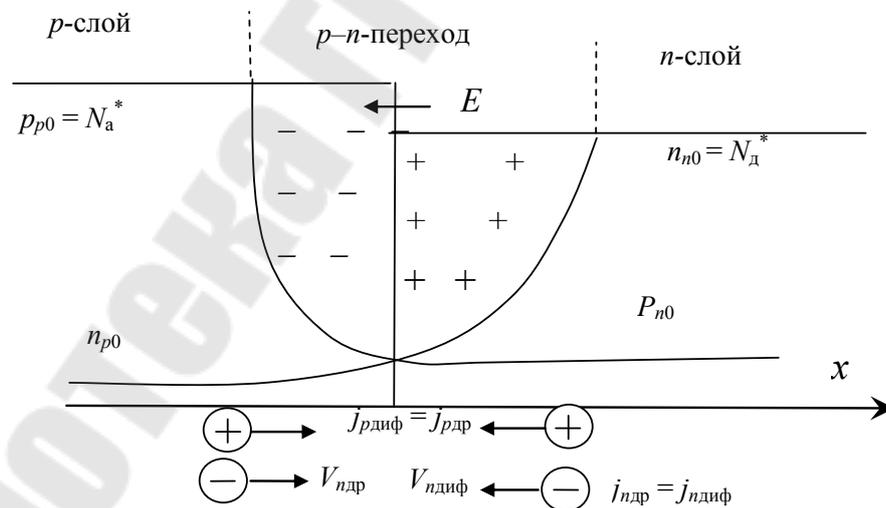


Рис. 1.1. Структура p - n -перехода

В несимметричном переходе (например, $p_{p0} \gg n_{n0}$) электронная составляющая тока значительно меньше дырочной и ею можно пренебречь. Переход в целом нейтрален, и отрицательный заряд слева равен положительному заряду в правой области перехода. Так как

концентрация примеси $N_a \gg N_d$, то при равенстве объемных зарядов область пространственного заряда доноров значительно шире, чем акцепторов. Поэтому несимметричный p - n -переход расположен в основном в более высокоомном n -слое.

На рис. 1.2 приведена энергетическая диаграмма p - n -перехода в равновесном состоянии. Постоянство уровня Ферми φ_F в кристалле полупроводника приводит к искривлению зон и появлению потенциального барьера или контактной разности потенциалов $\Delta\varphi_0$. Токи диффузии образуются в результате движения носителей, обладающих достаточной энергией для преодоления потенциального барьера.

Высоту потенциального барьера можно найти:

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_T \cdot \ln \frac{P_{p0} n_{n0}}{n_i^2} = \varphi_T \cdot \ln \frac{P_{p0}}{P_{n0}} = \varphi_T \cdot \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}}, \quad (1)$$

где φ_T – температурный потенциал. При комнатной температуре $\varphi_T = 25$ мВ.

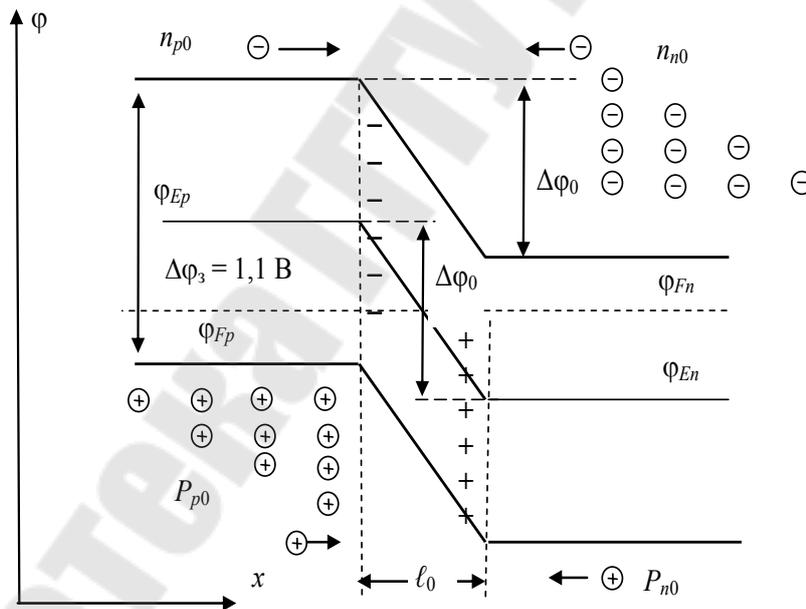


Рис. 1.2. Энергетическая диаграмма p - n -перехода в равновесном состоянии

Так как собственная концентрация для германия значительно больше, чем для кремния: $n_{iGe} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $n_{iSi} = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, то для германия контактная разность потенциалов меньше, чем для кремния. Для германиевых переходов $\Delta\varphi_0 = 0,4$ В, для кремниевых $\Delta\varphi_0 = 0,7$ В.

Внешнее напряжение, приложенное к p - n -переходу, изменяет высоту потенциального барьера на величину этого напряжения. Если направление внешнего напряжения совпадает с напряжением внутреннего поля, то высота потенциального барьера увеличивается. Такое включение p - n -перехода называют обратным. Таким образом, обратное смещение p - n -перехода соответствует подключению внешнего напряжения плюсом к n -слою (катоде) и минусом к p -слою (аноду).

На рис. 1.3 приведена энергетическая диаграмма p - n -перехода при обратном смещении. Высота потенциального барьера увеличивается по сравнению с равновесным состоянием:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + U_{\text{обр}}.$$

Термодинамическое равновесие между диффузионными и дрейфовыми токами нарушается. Согласно распределению Ферми количество носителей, способных преодолеть потенциальный барьер, уменьшается, ток диффузии стремится к нулю.

Суммарный ток обусловлен в основном дрейфом неосновных носителей. Этот ток называют тепловым, так как он зависит от концентрации неосновных носителей, которая, в свою очередь, сильно зависит от температуры. С ростом температуры концентрация неосновных носителей возрастает за счет разрыва ковалентных связей – генерации пары электрон–дырка под действием фононов – колебаний атомов кристаллической решетки. С ростом температуры концентрация p_{n0} , а вместе с ней и тепловой ток возрастают экспоненциально. При обратном смещении ширина p - n -перехода увеличивается.

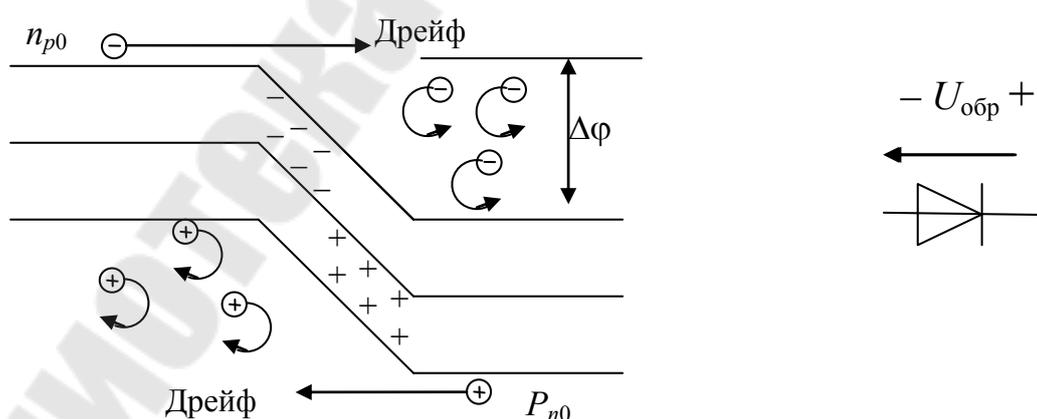


Рис. 1.3. Энергетическая диаграмма p - n -перехода при обратном смещении

Если внешнее напряжение приложено плюсом к p -слою и минусом к n -слою (встречно внутреннему полю), то высота потенциального барьера уменьшается (рис. 1.4). Такое включение p – n -перехода называют прямым, а внешнее напряжение – прямым напряжением.

При уменьшении высоты потенциального барьера количество основных носителей, способных преодолеть потенциальный барьер, экспоненциально возрастает, токи диффузии увеличиваются.

Термодинамическое равновесие нарушается. Поскольку концентрация основных носителей значительно (на несколько порядков) превышает концентрацию неосновных, то ток диффузии при прямом смещении p – n -перехода значительно превышает тепловой ток.

P – n -переход обладает вентиляльными свойствами – прямое сопротивление значительно меньше обратного.

В неравновесном состоянии концентрация неосновных носителей заряда в приграничных с переходом областях отличается от равновесной за счет нарушения равновесия между уходом (дрейфовый ток) и приходом (ток диффузии) носителей.

При прямом смещении приграничная концентрация неосновных носителей увеличивается, при обратном – уменьшается. По мере удаления от границы перехода вглубь областей p - и n -типа концентрация неосновных носителей стремится к равновесной за счет диффузии и рекомбинации.

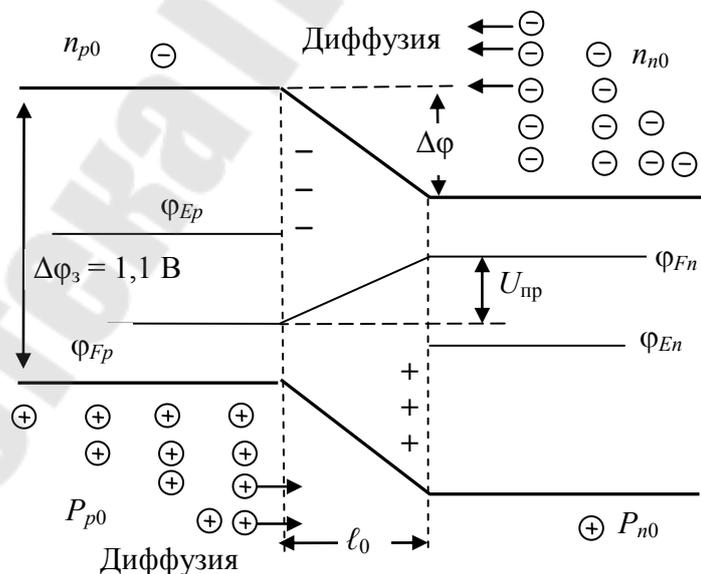


Рис. 1.4. Энергетические диаграммы p – n -перехода при прямом смещении

На рис. 5 приведено распределение неосновных носителей по пространственной координате для различных режимов работы.

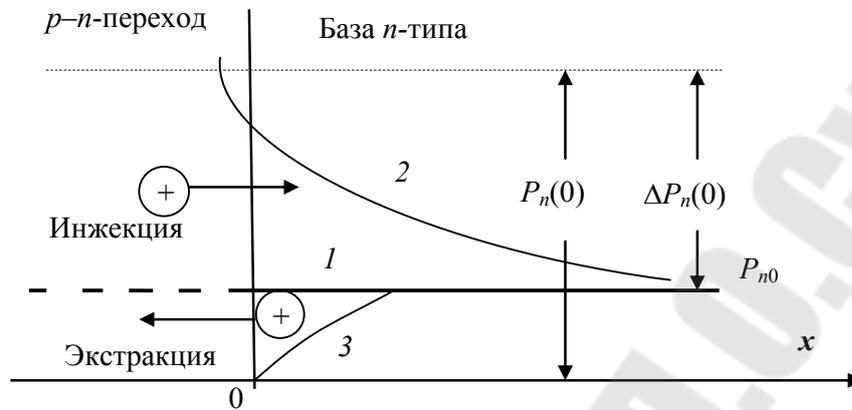


Рис. 1.5. Распределение неосновных транзисторов в базе $p_n(x)$:
 1 – в равновесном состоянии; 2 – при прямом смещении;
 3 – при обратном смещении

Из формулы (1) найдем равновесную концентрацию неосновных носителей p_{n0} в n -слое:

$$p_{n0} = p_{p0} e^{-\Delta\phi_0/\phi_T}. \quad (2)$$

Граничную неравновесную концентрацию найдем путем замены равновесной высоты потенциального барьера на неравновесную:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 - U,$$

где $U = -U_{\text{обр}}$ при обратном смещении (рис. 3); $U = +U_{\text{пр}}$ при прямом смещении (рис. 4).

Неравновесная граничная концентрация:

$$p_n(0) = p_{p0} e^{\frac{\Delta\phi}{\phi_T}} = p_{p0} e^{\frac{\Delta\phi_0 - U}{\phi_T}} = P_{n0} e^{\frac{U}{\phi_T}}. \quad (3)$$

Избыточная концентрация определяется как разность между неравновесной и равновесной:

$$\Delta p_n(0) = p_n(0) - P_{n0} = P_{n0} (e^{U/\phi_T} - 1). \quad (4)$$

При прямом смещении граничная концентрация возрастает:

$$p_n(0) = P_{n0} e^{\frac{U}{\phi_T}} \gg P_{n0},$$

$$\Delta p_n(0) = P_{n0} (e^{U/\phi_T} - 1) \gg P_{n0}.$$

Увеличение концентрации неосновных носителей при прямом смещении p – n -перехода называется **инжекция**.

При протекании прямого тока дырки инжектируются в n -слой из p -слоя, а электроны – из n -слоя в p -слой. Граничная избыточная концентрация электронов в n -слое определяется аналогично (4):

$$\Delta n_p(0) = n_p(0) - n_{p0} = n_{p0} (e^{U_{np}/\varphi_T} - 1).$$

Отношение избыточных концентраций:

$$\Delta p_n(0) / \Delta n_p(0) = p_{n0} / n_{p0} = (n_i p_{p0}) / (n_{n0} n_i) = p_{p0} / n_{n0} \approx N_a^* / N_d^*.$$

В случае несимметричного перехода, например, при $N_a \gg N_d$, инжекцией электронов можно пренебречь, а ток через переход в основном определяется движением дырок. Имеет место односторонняя инжекция. Область, инжектирующая носители (сильнолегированная), называется **эмиттер**, а низколегированная область, в которую инжектируются неосновные для нее носители, называется **база**. Инжекция из базы в эмиттер незначительна, поэтому исследуют лишь концентрацию неосновных носителей в базе.

Зависимость избыточной концентрации в базе от пространственной координаты x описывается уравнением

$$\Delta p_n(x) = \Delta p_n(0) e^{-x/L_p} = P_{n0} (e^{U_{np}/\varphi_T} - 1) e^{-x/L_p}, \quad (5)$$

где L_p – диффузионная длина – расстояние, на котором концентрация дырок уменьшается вследствие рекомбинации в e раз. Длина L_p равна средней длине пробега дырки за время жизни.

Избыточная концентрация в глубине полупроводника n -типа экспоненциально спадает и равна нулю при $x \gg L_p$. При обратном смещении граничная концентрация уменьшается:

$$p_n(0) = p_{p0} e^{-\frac{\Delta\varphi}{\varphi_T}} = p_{p0} e^{-\frac{\Delta\varphi_0 + U_{обр}}{\varphi_T}} = P_{n0} e^{-\frac{U_{обр}}{\varphi_T}} \approx 0 \text{ при } U_{обр} \gg \varphi_T, \quad (6)$$

$$\Delta p_n(0) = p_n(0) - p_{n0} = -p_{n0}.$$

Уменьшение концентрации неосновных носителей при обратном смещении p – n -перехода называется **экстракция**.

Прямое смещение, таким образом, сопровождается инжекцией, а обратное – экстракцией неосновных носителей.

Ток через переход обусловлен движением дырок через переход. В базе движение дырок обусловлено диффузией под действием градиента концентрации dp_n/dx .

В приграничной к переходу области базы вследствие рекомбинации инжектированных дырок с электронами концентрация электронов уменьшается. Для поддержания электронейтральности базы из глубины n -слоя двигаются электроны, обуславливающие электронный ток рекомбинации. Сумма дырочного и электронного токов в базе остается постоянной – не зависит от x (рис. 1.6).

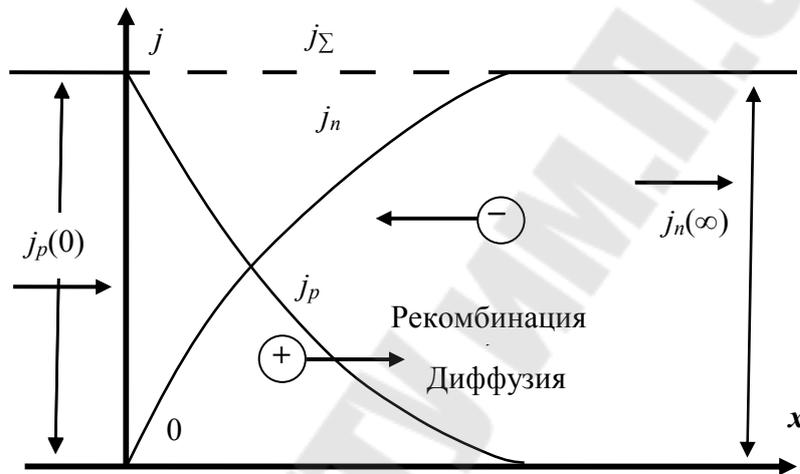


Рис. 1.6. Плотности дырочного и электронного токов в базе при прямом смещении и односторонней инжекции

Суммарная плотность тока при $x = 0$ обеспечивается дырочной составляющей $j_p(0)$ (электронная составляющая $j_n(0) = 0$), а при $x = \infty$ – электронной составляющей $j_n(\infty)$:

$$j_{\Sigma} = j_p(x) + j_n(x) = j_p(0) = j_n(\infty).$$

Суммарная плотность тока через p - n -переход может быть найдена как дырочный ток диффузии при $x = 0$:

$$j_{\Sigma} = j_p(0) = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x=0} = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} (e^{U_{np}/\varphi_T} - 1).$$

Для получения полного тока необходимо плотность тока умножить на площадь S перехода:

$$I = S \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} (e^{U/\varphi_T} - 1) = I_0 (e^{U/\varphi_T} - 1).$$

Ток $I_0 = SqD_p p_{n0} / L_p$ называется тепловым током p - n -перехода или током насыщения.

При больших обратных напряжениях $e^{-U_{обр}/\varphi_T} \approx 0$, $I = -I_0$ и не зависит от $U_{обр}$.

Учитывая определение диффузионной длины $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$,

$$I_0 = qSL_p pL_{n0} / \tau_p = qVG_p,$$

где $p / \tau_p = G_p$ – скорость термогенерации дырок.

Тепловой ток обусловлен генерацией дырок в прилегающем к p - n -переходу объеме $V = SL_p$ полупроводника n -типа.

Концентрация неосновных носителей p_{n0} пропорциональна n_i^2 . Собственная концентрация n_i обратно пропорциональна ширине запрещенной зоны, которая для кремния составляет 1,11 В, а для германия – 0,67 В. Для кремния n_i на три порядка меньше, чем для германия, обратный ток кремниевых диодов теоретически в 10^6 раз меньше, чем германиевых.

Особенностью полупроводниковых диодов является резкое (экспоненциальное) увеличение прямого тока при увеличении прямого напряжения в соответствии с формулой (6).

Вольт-амперная характеристика идеализированного диода:

$$I = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1), \quad (7a)$$

$$U = \varphi_T \ln(I / I_0 + 1). \quad (7б)$$

Так как ток I_0 для германия много больше, чем для кремния, в соответствии с (7б) при заданном прямом токе прямое напряжение германиевых диодов меньше, чем кремниевых (рис. 1.7).

Вольт-амперная характеристика полупроводниковых диодов сильно зависит от температуры. Зависимость теплового (обратного) тока от температуры:

$$I_0(T) = I_0(T_0)2^{\Delta T/T^*}, \quad (8)$$

где $I_0(T_0)$ – известный тепловой ток при температуре T_0 (20–25 °С); $I(T)$ – искомый ток при температуре T ; $\Delta T = T - T_0$ – приращение температуры; T^* – температура удвоения – приращение температуры, при котором тепловой ток удваивается. Обычно на практике принимают $T^* = 10$ °С.

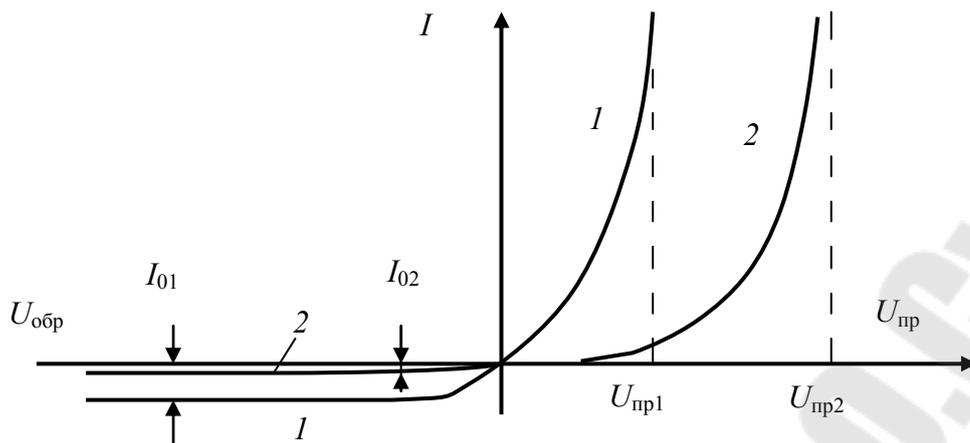


Рис. 1.7. ВАХ идеализированных диодов:
1 – германиевого; 2 – кремниевого

Зависимость прямого напряжения от температуры:

$$U_{\text{пр}}(T) = U_{\text{пр}}(T_0) + (dU_{\text{пр}} / dT)\Delta T, \quad (9)$$

где $(dU_{\text{пр}} / dT)$ – температурная чувствительность или температурный коэффициент напряжения.

Для практических расчетов принимают $(dU_{\text{пр}} / dT) = -2$ мВ/°С. У реального диода обратный ток на несколько порядков превышает тепловой ток и обусловлен влиянием нескольких составляющих. Основное влияние оказывает ток термогенерации. Так как реальный $p-n$ -переход имеет конечную ширину, то в объеме обедненного носителями слоя протекают свойственные полупроводникам процессы термогенерации (образование электронно-дырочных пар) и процесс рекомбинации проникающих в область $p-n$ -перехода носителей с энергией, недостаточной для преодоления поля, генерируемые носители быстро уходят от потенциального барьера. В электрическом слое носители уходят в соответствующий слой диода, образуя ток термогенерации. В процессе рекомбинации носителей в области $p-n$ -перехода образуется ток рекомбинации, который в равновесном состоянии (отсутствии приложенного напряжения) компенсирует ток термогенерации. В случае обратного включения диода из-за увеличения высоты потенциального барьера количество проникающих в $p-n$ -переход носителей уменьшается и при $U_{\text{обр}} \gg \phi_T$ ток рекомбинации практически отсутствует, а ток термогенерации возрастает, так как с ростом обратного напряжения увеличивается ширина и объем $p-n$ -перехода. У кремниевых диодов, обладающих малыми тепловыми токами, в обратном токе при комнатной температуре преобладает ток

термогенерации, а у германиевых преобладает тепловой ток. Кроме тока термогенерации, увеличение обратного тока реального диода вызвано также влиянием поверхностных токов утечки. На рис. 1.8 приведена обратная ветвь ВАХ реального диода и эквивалентная схема замещения диода в обратном включении. Схема замещения содержит резистор и источник тока:

$$I_{\text{обр}} = I_0 + U_{\text{обр}} / r_{\text{обр}}. \quad (10)$$

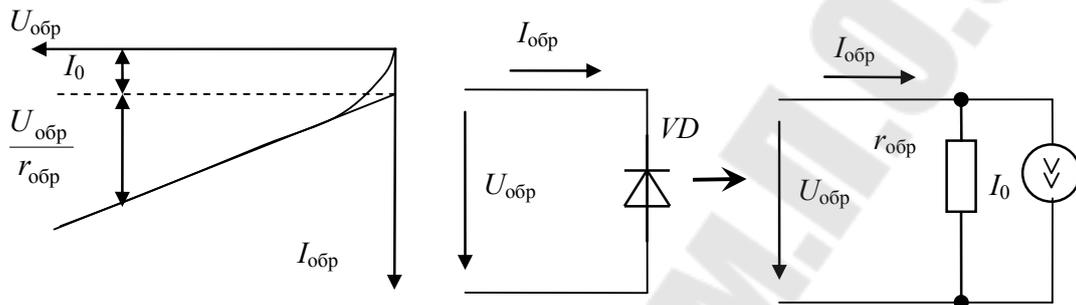


Рис. 1.8. Обратная ветвь ВАХ реального диода и эквивалентная схема

При прямом смещении диода равновесие между процессами термогенерации и рекомбинации в $p-n$ -переходе нарушается. Уменьшение высоты потенциального барьера приводит к росту проникающих в обедненный слой носителей и, соответственно, к увеличению тока рекомбинации, влияние которого становится заметным при малых прямых токах.

На рис. 1.9 в полулогарифмическом масштабе построена прямая ветвь ВАХ реального диода.

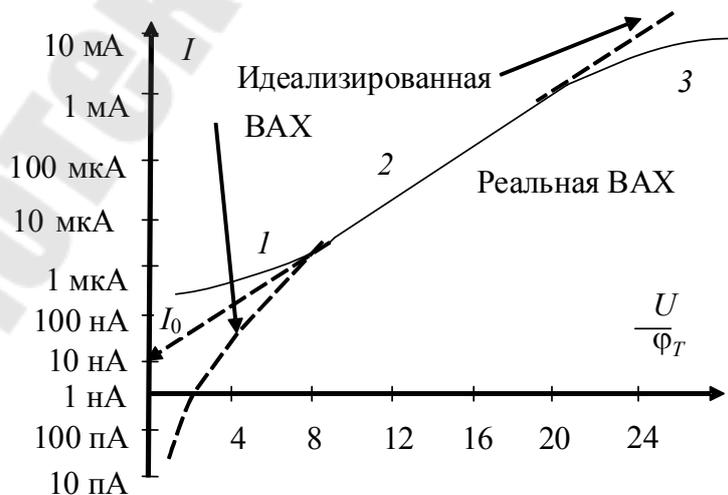


Рис. 1.9. Прямая ветвь ВАХ реального диода

Пунктирной линией построена ВАХ идеализированного диода в соответствии с формулой (7). Отклонение реальной ВАХ от прямой на участке 1 обусловлено влиянием тока рекомбинации. На участке 2 протекание тока обусловлено в основном диффузией и рекомбинацией носителей в нейтральных областях. На участке 3 отклонения ВАХ от прямой объясняется дополнительным падением напряжения на объемном омическом сопротивлении низколегированной области диода (базы).

Нелинейные свойства диода в прямом включении характеризуются дифференциальным сопротивлением $R_{\text{диф}}$. В соответствии с формулой (7б):

$$r_{\text{диф}} = dU/dI = \varphi_T / I. \quad (11)$$

Сопротивления $r_{\text{диф}}$ реального диода определяются графо-аналитическим методом на прямой ветви ВАХ (рис. 1.10).

Значение $r_{\text{диф}}$ находят как арктангенс угла наклона касательной в заданной точке 0.

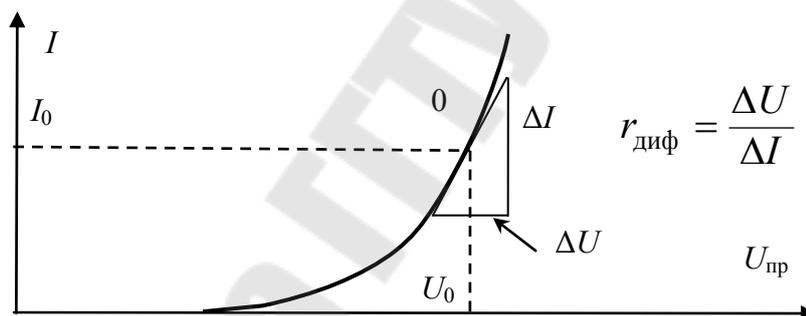


Рис. 1.10. Определение дифференциального сопротивления $r_{\text{диф}}$

На практике при анализе нелинейных схем на диодах часто используют кусочно-линейную аппроксимацию прямой ветви ВАХ (рис. 1.11, а) и соответствующую этой аппроксимации эквивалентную схему диода при прямом включении (рис. 1.11, б).

Аналитическая аппроксимация прямой ветви ВАХ описывается уравнением

$$I_{\text{пр}} = (U_{\text{пр}} - E_{\text{пр}}) / r_{\text{пр}}, \quad U > E_{\text{пр}}. \quad (12)$$

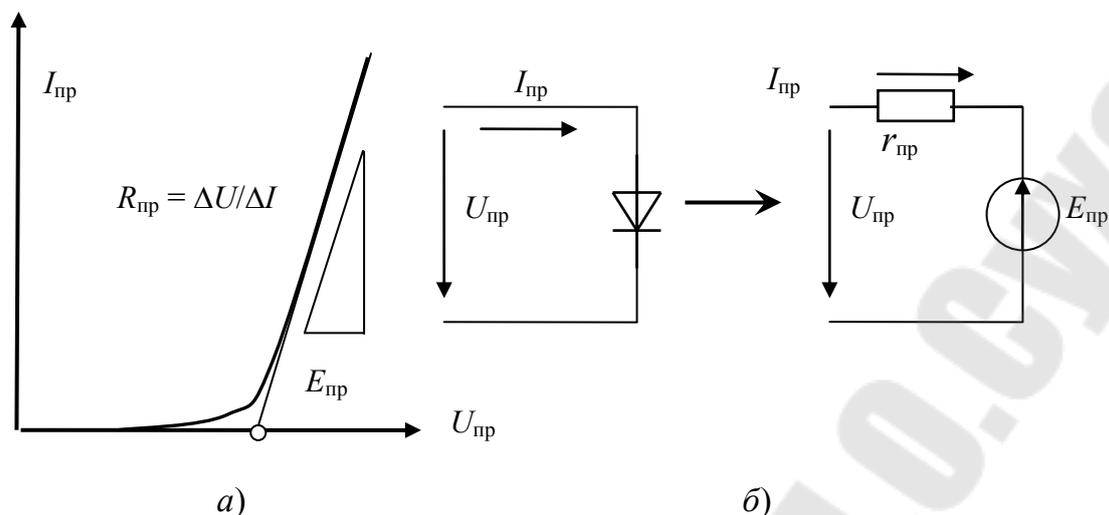


Рис. 1.11. Кусочно-линейная аппроксимация:
 а – прямой ветви ВАХ диода; б – эквивалентная схема

3. МЕТОДИКА И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследуются кремниевый эпитаксиально-планарный диод типа КД503 и германиевый микросплавной диод ГД508.

Электрические параметры исследуемых диодов даны в таблице.

Таблица 1.1

Параметр	КД503А	ГД508Б
Постоянное прямое напряжение при прямом токе 10 мА, не более	0,72–1,0 В	0,4–0,65 В
Импульсное прямое напряжение, не более	1,75 В $I_{пр.и} = 50$ мА	1,5 В $I_{пр.и} = 50$ мА
Постоянный обратный ток, не более	10 мкА $U_{обр} = 30$ В $T = 273–343$ К	60 мкА $U_{обр} = 8$ В $T = 298$ К
Общая емкость диода	1,45–5 пФ, $U_{обр} = 0$	0,75 пФ, $U_{обр} = 0,5$ В
<i>Предельные эксплуатационные параметры</i>		
Постоянное (импульсное) обратное напряжение	30 В	8(10) В
Постоянный или средний прямой ток	15 мА при 343 К, 20 мА при 233–298 К	10 мА
Импульсный прямой ток (без превышения среднего прямого тока) при $T_{и} < 10$ мкс	200 мА $T = 233–258$ К, 150 мА при 343 К	30 мА
Температура окружающей среды	233–243 К	233–328 К

Прямой ток диода при увеличении напряжения неограниченно возрастает, что может привести к тепловому пробое $p-n$ -перехода. Поэтому прямую ветвь ВАХ снимают в режиме заданного тока, изменяя его от 0 до 10 мА и измеряя напряжение.

Обратную ветвь диода снимают в режиме заданного напряжения. При экспериментальном исследовании диодов необходимо учитывать, что при прямом смещении сопротивление диода составляет единицы Ом, а при обратном – сотни кОм. Поэтому схему подключения амперметра и вольтметра в каждом случае должна быть такой, чтобы обеспечить минимальную методическую погрешность, обусловленную собственным потреблением приборов. Исследуемые кремниевый и германиевый диоды, а также токоограничивающие резисторы расположены на лабораторном планшете. Схема эксперимента приведена на рис. 1.12.

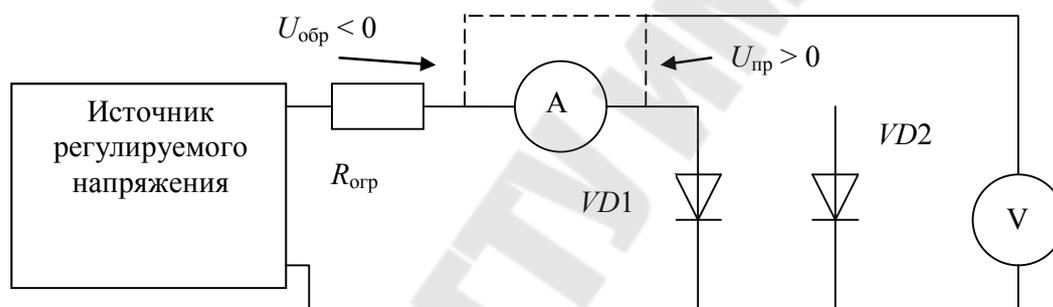


Рис. 1.12. Схема эксперимента

4. ЗАДАНИЕ

4.1. С помощью вольтметра определить полярности и диапазоны регулировки выходных напряжений источника питания.

4.2. Собрать схему эксперимента (рис. 1.12). Снять зависимость обратного тока германиевого диода $VD2$ от напряжения. Данные занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

$U_{обр}$, В	0,1	0,2	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{обр}$, мкА													

4.3. Построить обратную ветвь ВАХ диода $VD2$. Определить параметры эквивалентной схемы в обратном включении.

4.4. Задавая прямой ток диодов, снять зависимость прямых напряжений для $VD1$ и $VD2$. Для удобства регулировки тока использовать разные значения $R_{огр}$, начиная с максимального. Данные занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

$I_{пр}, \text{мА}$		0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{пр}, \text{В}$	$VD1$														
	$VD2$														

4.5. Построить в линейном масштабе прямую ветвь ВАХ диодов $VD1$ и $VD2$. Определить параметры эквивалентной схемы $E_{пр}$ и $r_{пр}$ для $VD1$ и $VD2$.

4.6. Построить в полулогарифмическом масштабе прямую ветвь ВАХ диодов $VD1$ и $VD2$. Нанести на график идеализированную прямую (рис. 1.9) и определить тепловые токи диодов I_{01} и I_{02} .

4.7. Рассчитать значения дифференциального сопротивления $r_{диф}$ в соответствии с (11) и (12). Данные расчета занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

$I_{пр}, \text{мА}$		0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_{диф}, \text{Ом}$	$VD1$														
	$VD2$														

4.8. Графо-аналитически определить (по результатам п. 4.5) значения $r_{диф}$ для $VD1$ и $VD2$. Результаты занести в таблицу, аналогичную табл. 1.4.

4.9. По результатам пп. 4.7 и 4.8 построить зависимости $r_{диф}$ диодов $VD1$ и $VD2$ от прямого тока и прямого напряжения.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, краткое качественное описание работы полупроводникового диода с указанием специфики кремниевых и германиевых диодов, схему и результаты эксперимента, сравнительный анализ параметров кремниевого и германиевого диода.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется различие в значениях тепловых токов кремниевых и германиевых диодов?
2. Почему различаются прямые напряжения кремниевых и германиевых диодов?
3. Объяснить причины отклонения обратной ветви ВАХ реального диода от идеализированного.
4. Чем обусловлено отличие прямой ветви ВАХ реального диода от экспоненты?
5. Изобразить эквивалентную схему диода при обратном включении.
6. Изобразить эквивалентную схему диода при прямом включении.
7. Изобразить структуру $p-n$ -перехода.
8. Изобразить зонную диаграмму $p-n$ -перехода в равновесном состоянии.
9. Изобразить зонную диаграмму $p-n$ -перехода при прямом смещении.
10. Изобразить зонную диаграмму $p-n$ -перехода при обратном смещении.
11. Изобразить распределение носителей в $p-n$ -переходе в равновесном состоянии, при прямом и обратном смещении.
12. Что такое инжекция?
13. Сформулировать условие односторонней инжекции.
14. Что такое экстракция?
15. Описать состояние $p-n$ -перехода в больцмановском равновесии.
16. Как определяется высота потенциального барьера $p-n$ -перехода?
17. Как зависит граничная концентрация неосновных носителей от приложенного к $p-n$ -переходу внешнего напряжения?
18. Чем объясняются вентильные свойства $p-n$ -перехода?
19. Какая область называется базой, эмиттером?
20. Как связан ток диффузии с градиентом концентрации?
21. Как связан дрейфовый ток с напряженностью электрического поля?
22. Приведите температурную зависимость обратного тока.
23. Как прямое напряжение на диоде зависит от температуры?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИТРОНОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы: ознакомление с основными физическими процессами, протекающими в $p-n$ -переходе в режиме пробоя, ознакомление с типами пробоя полупроводниковых диодов, исследование вольт-амперных характеристик и определение нормируемых параметров полупроводниковых низковольтного, двуханодного и прецизионного (термокомпенсированного) стабилитронов, исследование параметрического стабилизатора напряжения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Стабилитроном называется полупроводниковый прибор, напряжение на котором слабо зависит от протекающего тока. Такая зависимость характерна для режима пробоя на обратной ветви полупроводникового диода. Поэтому основной особенностью стабилитрона является то, что он работает в режиме пробоя. Различают лавинный, туннельный, тепловой, поверхностный пробой.

Лавинный пробой – это лавинное размножение носителей заряда в $p-n$ -переходе, вызванное ударной ионизацией атомов кристаллической решетки носителями заряда.

Лавинный пробой возможен, если ширина $p-n$ -перехода l значительно больше длины свободного пробега электрона d . При обратном смещении ширина перехода увеличивается и для несимметричного перехода ($N_a \gg N_d$) и при $U_{обр} \gg \Delta\phi_0$ равна (рис. 2.1):

$$l = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \left(\frac{1}{N_a^*} + \frac{1}{N_d^*} \right) (\Delta\phi_0 + U_{обр})} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN_d^*} U_{обр}}.$$

При увеличении внешнего напряжения $U_{обр}$ напряженность поля E возрастает:

$$E = \frac{U_{обр}}{l} = \sqrt{\frac{qN_d^*}{2\varepsilon\varepsilon_0} U_{обр}}.$$

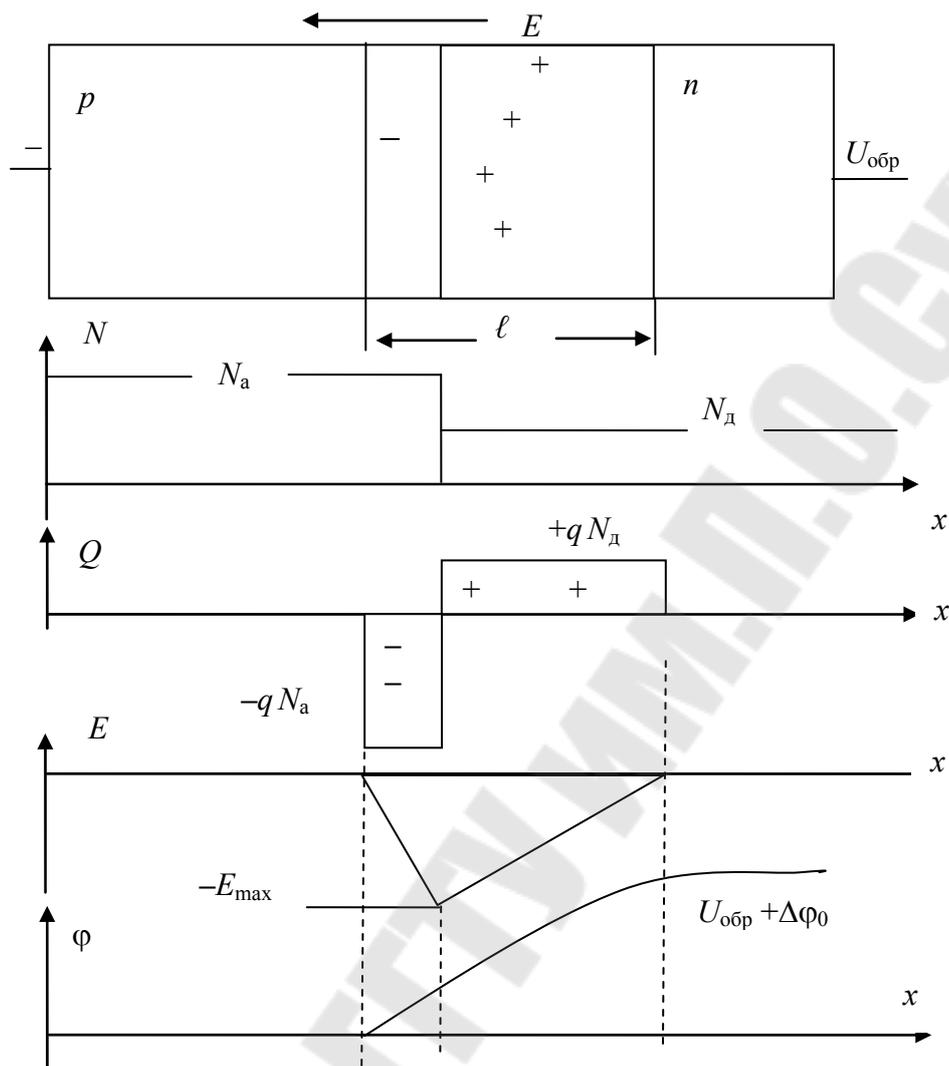


Рис. 2.1. Несимметричный p - n -переход

Электроны и дырки, разогнавшись в этом поле, могут набрать скорость и приобрести энергию, достаточную для ионизации атома вещества, т. е. для отрыва от него валентного электрона. В результате разрыва валентной связи в зоне проводимости появляется новый свободный электрон, а в валентной зоне – дырка. Эти носители также могут приобрести энергию, достаточную для ионизации, и создавать новые электронно-дырочные пары.

С ростом напряженности электрического поля, при увеличении внешнего напряжения, носители получают все большую энергию, интенсивность ударной ионизации возрастает и процесс образования электронно-дырочных пар приобретает лавинный характер. Ток через переход при этом резко возрастает.

Напряжение, на котором начинается лавинное размножение носителей заряда, называется напряжением лавинного пробоя. Отношение числа электронно-дырочных пар, образованных в результате ионизации, к числу вошедших в p - n -переход электронов называется коэффициентом умножения M . Пробой наступает, когда M стремится к бесконечности.

Величина M зависит от напряжения U , от распределения примесей:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{проб}}} \right)^m},$$

где $m = 2-6$ – постоянная для определенного материала; $U_{\text{проб}}$ – напряжение пробоя p - n -перехода.

При увеличении концентрации примеси в базе напряжение пробоя уменьшается (рис. 2.2), так как при этом уменьшается ширина области пространственного заряда и увеличивается энергия и скорость носителей в приграничной зоне.

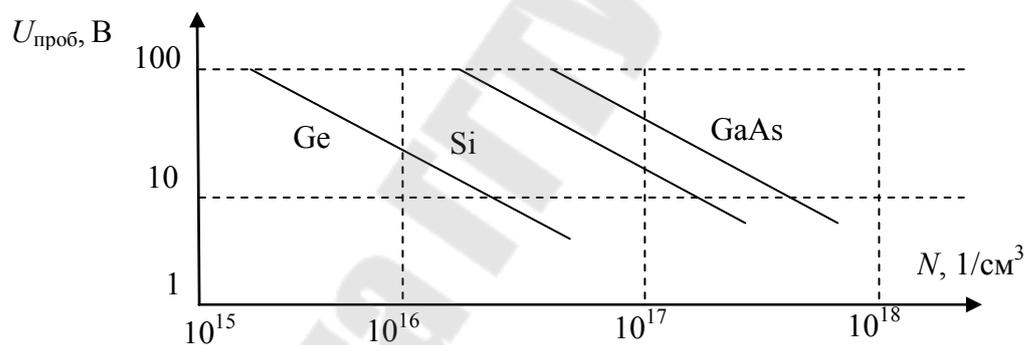


Рис. 2.2. Зависимость напряжения лавинного пробоя от концентрации примеси

Туннельный пробой наступает при концентрациях примеси и достигает примерно 10^{18} $1/\text{см}^3$.

Туннельный пробой возникает в переходах, где длина свободного пробега зарядов d больше ширины p - n -перехода l . При этом существует вероятность того, что заряд, имеющий кинетическую энергию меньшую высоты потенциального барьера, может при определенных условиях преодолеть барьер. Туннельный пробой возможен, если с обеих сторон потенциального барьера имеются разрешенные энер-

гетические уровни. Возрастание туннельного тока в области пробоя происходит при напряженности поля E , большей критической $E_{кр}$.

Экспериментально найдено, что для германия $E_{кр}$ составляет примерно $4 \cdot 10^5$ В/см, для кремния – $1,4 \cdot 10^6$ В/см.

Оба рассмотренных вида пробоя являются обратимыми, т. е. не ведут к физическому разрушению p – n -перехода. При этом обратные ток и напряжение ограничены в некоторых пределах. Увеличение обратных тока и напряжения сверх этих пределов приводит к тепловому пробую. При протекании обратного тока через p – n -переход на нем выделяется мощность $P = U_{обр} I_{обр}$. Если количество выделенного тепла превысит количество тепла, отводимого от p – n -перехода, то температура перехода начнет повышаться, что приведет к увеличению концентрации носителей заряда и росту обратного тока. Это еще больше увеличит количество выделяемого тепла, а концентрация носителей увеличится еще больше и т. д. Такой процесс может привести к перегреву кристалла полупроводника – тепловому пробую.

Тепловой пробой обычно наступает вследствие нарушения условий эксплуатации полупроводникового прибора, после лавинного или туннельного пробоя, поэтому его называют вторичным пробоем.

Мощность, отводимая от p – n -перехода, определяется по формуле

$$P = \frac{T_{пер} - T_{к}}{R_{тп-к}},$$

где $T_{пер}$ – температура p – n -перехода; $T_{к}$ – температура корпуса полупроводникового прибора; $R_{тп-к}$ – тепловое сопротивление переход–корпус.

Понятие теплового сопротивления R_T получено с помощью метода электротепловой аналогии, где разность температур соответствует разности потенциалов, а тепловая мощность – электрическому току. Следуя этой аналогии, отношение разности температур к выделяемой мощности есть тепловое сопротивление. R_T определяется конструкцией полупроводникового прибора и условиями теплоотвода. Напряжение теплового пробоя тем меньше, чем больше R_T и начальный обратный ток I_0 .

Тепловому пробую соответствует участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 2.3).

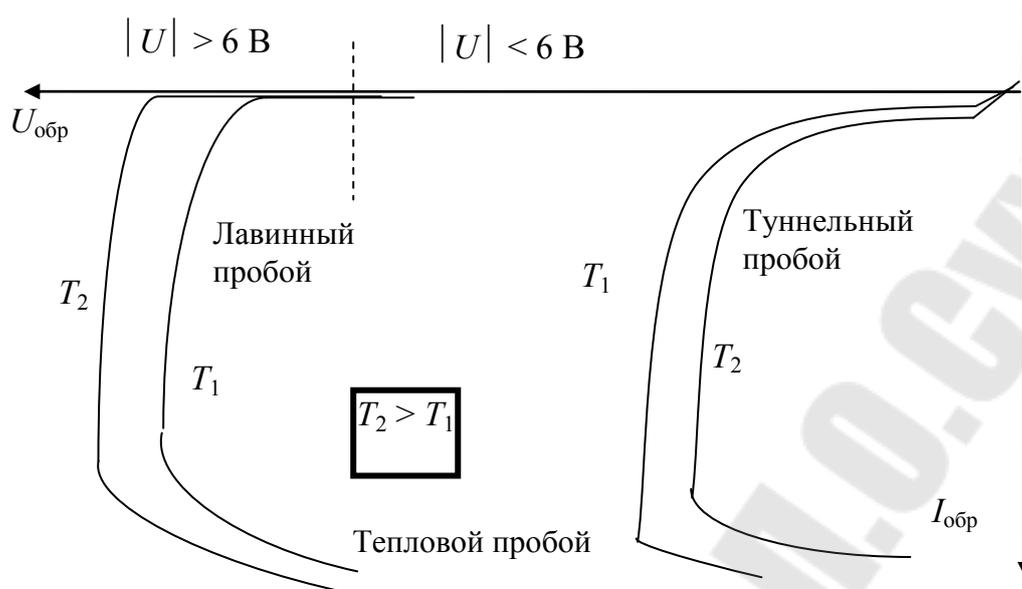


Рис. 2.3. Обратная ветвь ВАХ p - n -перехода при различных механизмах пробоя

Тепловой пробой, как правило, локализуется в некоторых «слабых» местах p - n -перехода, так как из-за начальной неоднородности обратного тока или неоднородности теплоотвода в некоторой области перехода температура может превысить среднюю по переходу. Это вызовет локальное увеличение плотности тока и выделяемой мощности, что в свою очередь еще больше повысит температуру данной области и т. д.

Для предотвращения теплового пробоя необходимо ограничивать обратный ток и напряжение на переходе в допустимых пределах и обеспечить качественный теплообмен между корпусом полупроводникового прибора и окружающей средой. Это достигается применением радиаторов, обдувом и пр.

Напряжение пробоя зависит от температуры окружающей среды, причем по-разному для разных видов пробоя.

Напряжение лавинного пробоя с ростом температуры увеличивается. Это происходит потому, что увеличиваются амплитуда и частота колебаний атомов основного материала полупроводника в узлах кристаллической решетки. В результате возрастает вероятность столкновения с ними носителей, еще не имеющих энергии ионизации. Число актов ионизации уменьшается, и резкого увеличения обратного тока через p - n -переход не происходит, пробой не наступает. Для того чтобы большее количество носителей приобрело энергию, необходимую для ионизации, необходимо увеличить напряжение.

В случае туннельного пробоя с ростом температуры уменьшается ширина запрещенной зоны, поэтому вероятность туннелирования электронов увеличивается. Следовательно, для наступления пробоя необходимо приложить меньшее обратное напряжение.

При увеличении температуры будут ухудшаться условия теплообмена между полупроводниковым прибором и окружающей средой. Это приведет к уменьшению рассеиваемой мощности и увеличению соотношения $P_{\text{выд}} / P_{\text{рас}}$. В этом случае тепловой пробой наступает при меньших обратных напряжениях.

Кроме рассмотренных, возможен **поверхностный** пробой, причиной которого может быть несоблюдение определенных технологических требований в процессе изготовления диода. Вследствие различных дефектов на поверхности полупроводника имеются энергетические уровни, на которых захватываются носители заряда, образующие поверхностный заряд. Из-за увеличения концентрации подвижных зарядов у поверхности ширина области объемного заряда (p - n -перехода) уменьшается, напряжение пробоя также уменьшается. Это явление носит название поверхностного пробоя.

Для исключения влияния поверхностного заряда на напряжение пробоя поверхность полупроводника защищают диэлектриком.

Полупроводниковые стабилитроны изготавливают из кремния. Это связано с тем, что p - n -переходы, изготовленные из кремния, имеют начальный обратный ток I_0 на порядок меньше, чем германиевые. Кроме того, температурная зависимость обратного тока от температуры у германиевых диодов значительно выше.

Выбор механизма пробоя для изготовления стабилитронов зависит от того, на каком уровне должен стабилизировать напряжение данный стабилитрон. С использованием туннельного пробоя можно стабилизировать напряжение на уровне до 5–6 В. Для изготовления более высоковольтных стабилитронов применяют механизм лавинного пробоя.

Вольт-амперная характеристика полупроводникового стабилитрона показана на рис. 2.4.

Основными параметрами стабилитрона являются:

$U_{\text{ст}}$, В – номинальное напряжение стабилизации при заданном токе $I_{\text{ст}}$;

$I_{\text{ст.мин}}$, мА – минимальный ток стабилизации, соответствуют началу устойчивого пробоя;

$I_{\text{ст.макс}}$, мА – максимальный ток стабилизации, ограничен допустимой мощностью рассеивания $P_{\text{доп}}$;

$r_{\text{ст}}$, Ом – дифференциальное сопротивление на участке пробоя, определяется (рис. 2.4):

$$r_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{ст.макс}} - U_{\text{ст.мин}}}{I_{\text{ст.макс}} - I_{\text{ст.мин}}}.$$

Величина $R_{\text{ст}}$ определяет качество стабилизации: чем меньше разность $U_{\text{ст.макс}}$ и $U_{\text{ст.мин}}$ (при $I_{\text{ст.макс}} - I_{\text{ст.мин}} = \text{const}$), тем стабильнее напряжение.

$\Delta U_{\text{ст}}$, В, % – допустимый разброс напряжения стабилизации – абсолютная или относительная разность между действительным и номинальным $U_{\text{ст}}$ при номинальном токе $I_{\text{ст}}$.

ТКН, %/К – температурный коэффициент нестабильности напряжения, равный отношению относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры при постоянном токе:

$$\text{ТКН} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}} \cdot \Delta T} 100 \text{ \%}.$$

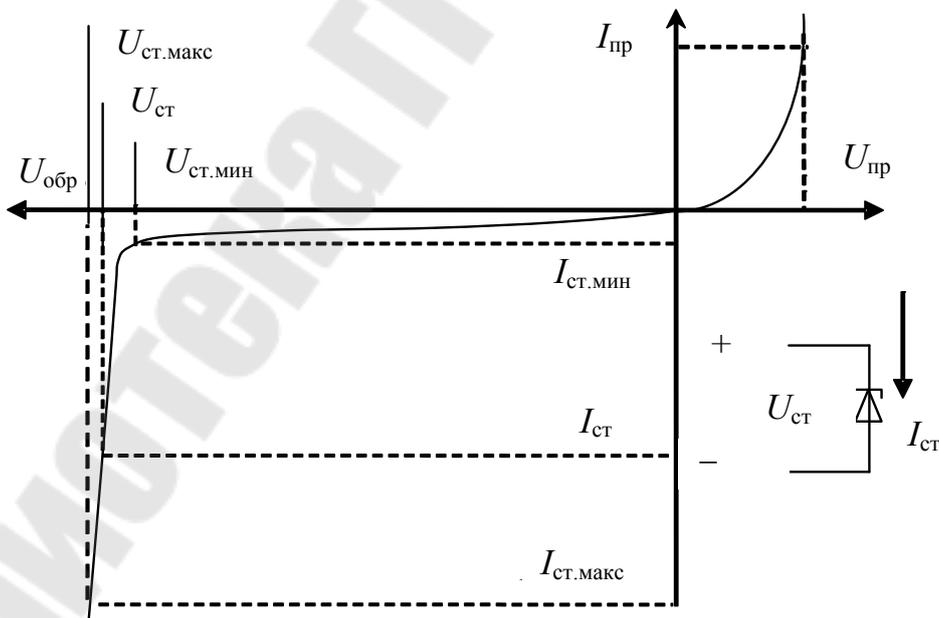


Рис. 2.4. ВАХ стабилитрона

Для низковольтных ($U_{ст} < -6$ В) стабилитронов $ТКН < 0$, так как они изготавливаются на основе туннельного пробоя. Соответственно, у высоковольтных стабилитронов, изготовленных на основе лавинного пробоя, $ТКН$ положительный.

Одним из способов уменьшения $ТКН$ является термокомпенсация (рис. 2.5). Суть ее заключается в последовательном соединении переходов с равными по значению, но разными по знаку $ТКН$. Например, если напряжение пробоя перехода имеет $ТКН = +6$ мВ/К, то при изготовлении стабилитрона последовательно с ним включают три прямосмещенных перехода, так как для прямого напряжения $ТКН$ равен примерно -2 мВ/К:

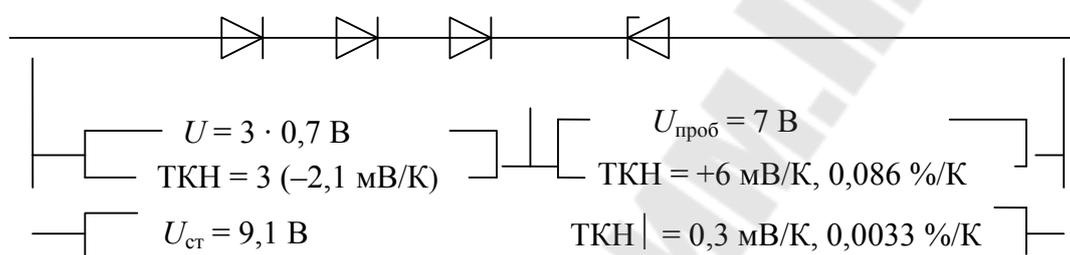


Рис. 2.5. Принципы термокомпенсации

$\delta U_{ст}$, % – временная нестабильность $U_{ст}$, показывает изменение напряжения стабилизации с течением времени эксплуатации стабилитрона – от 500 до 10000 ч;

$I_{пр.макс}$, мА – максимально допустимый постоянный прямой ток;

$U_{пр}$, В – постоянное прямое напряжение при заданном прямом токе;

$P_{макс}$, Вт – максимально допустимая мощность рассеивания.

Для стабилизации напряжений до 3 В применяется стабистор. В стабисторах используется прямая ветвь ВАХ p - n -перехода. $ТКН$ стабисторов отрицательный и определяется числом последовательно включенных прямосмещенных переходов.

Двуханодный стабилитрон содержит два встречно включенных p - n -перехода с общим катодом (рис. 2.6). Переходы работают поочередно в режиме пробоя при изменении полярности напряжения. Таким образом обеспечивается симметричность ВАХ стабилитрона. Для этого стабилитрона нормируется параметр $Н U_{ст}$ – несимметричность напряжения $U_{ст}$:

$$\delta U_{ст} = U_{ст1} - U_{ст2} \quad \text{при} \quad I_{ст1} = I_{ст2}.$$

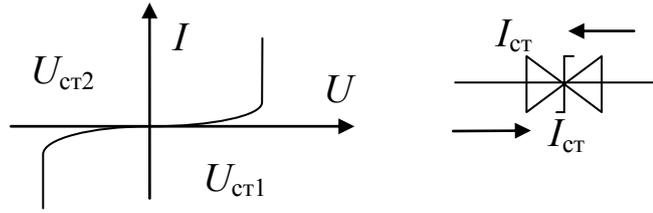
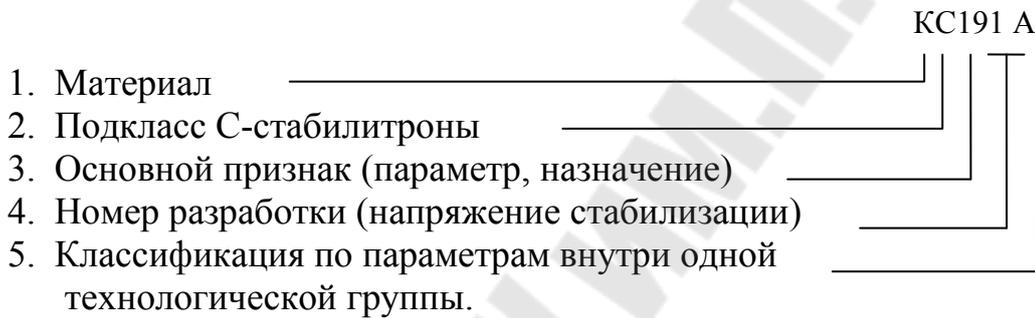


Рис. 2.6. Двуханодный стабилизатор

Стабилизаторы классифицируются по группам в соответствии с напряжением стабилизации и мощностью (рис. 2.7). Система обозначений стабилизаторов основана на общем для п/п приборов коде:



Третий элемент обозначения – цифра от 1 до 9 – указывает область применения по $U_{пр}$ и $P_{макс}$.

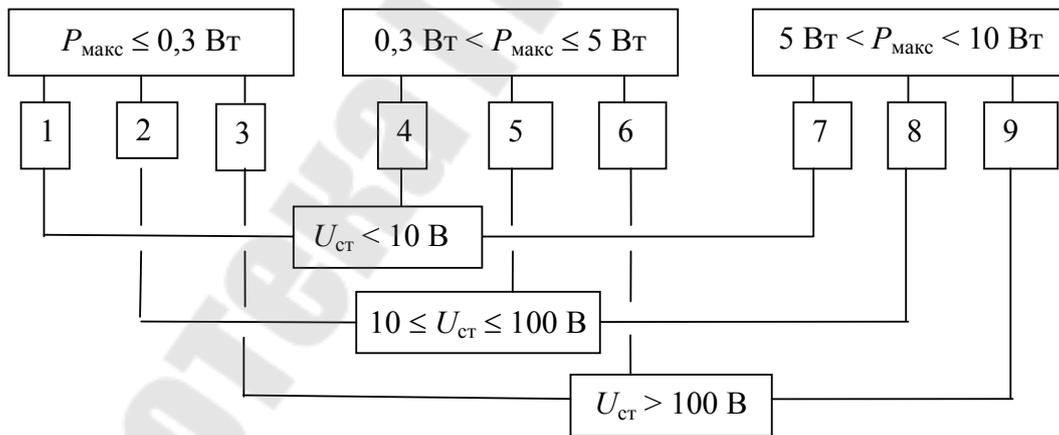


Рис. 2.7. Классификация стабилизаторов

Одно из назначений стабилизатора – стабилизация выпрямленного напряжения, изменяющегося вследствие нестабильности напряжения сети и наличия пульсации, т. е. применение в цепях питания.

Другое важное применение – в качестве опорного элемента для формирования эталонного напряжения в измерительных цепях.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследуются три стабилитрона:

- низковольтный КС133А (на основе туннельного пробоя);
- двуханодный КС168А, (175, 182);
- прецизионный КС191 (лавинный пробой с термокомпенсацией).

Схема для исследования ВАХ стабилитронов дана на рис. 2.8.

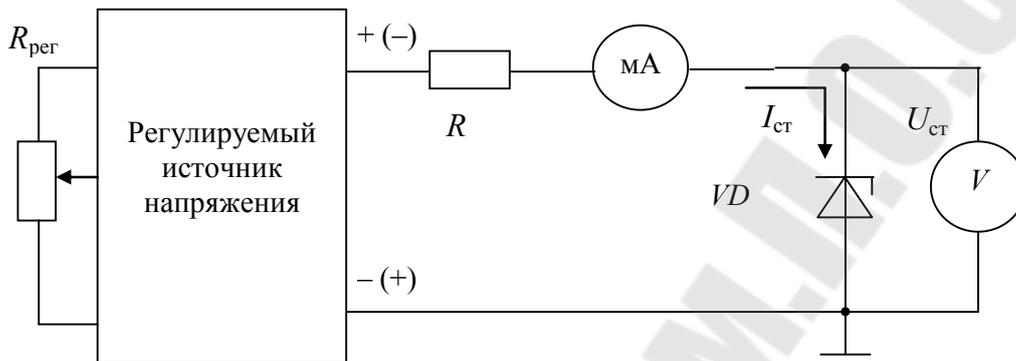


Рис. 2.8. Схема для исследования ВАХ стабилитронов

Перед измерением необходимо определить ожидаемое напряжение стабилизации (пробоя) по классификационным признакам, приведенным на стенде. Следует снять 2–3 точки ВАХ на предпробойном участке ($U_{\text{обр}} < U_{\text{ст}}$) и 6–8 точек на участке пробоя. В режиме пробоя изменение тока стабилитрона сопровождается слабым изменением напряжения.

При снятии ВАХ стабилитрона следует до наступления пробоя задавать обратное напряжение на стабилитроне и измерять ток.

При наступлении пробоя ($I_{\text{обр}} > 0,1$ мА) необходимо устанавливать заданный ток и измерять напряжение.

Максимальные токи для стабилитронов при снятии ВАХ: 20 мА для низковольтного, 15 мА для двуханодного и 10 мА для прецизионного. Для двуханодного стабилитрона снять обе ветви ВАХ. Для двух других стабилитронов качественно определить характер прямой ветви ВАХ.

4. ЗАДАНИЕ

4.1. Собрать схему для снятия ВАХ стабилитронов (рис. 2.8). Провести измерения для трех типов стабилитронов. Данные представить в виде табл. 2.1 для каждого стабилитрона.

Таблица 2.1

Стабилитрон « »	
$U_{обр}$, В	
$I_{обр}$, мА	

4.2. Построить ВАХ стабилитронов. Рассчитать параметры и сравнить их со справочными. Данные занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Стабилитрон				
Параметры	$U_{ст}$, В	$\Delta U_{ст}$, мВ	$\delta U_{ст}$, %	$r_{ст}$, Ом
Справочное значение				
Результат измерения				

Указание. В качестве измеренного номинального значения $U_{ст}$ принять напряжение при номинальном токе (справ.) для данного типа стабилитрона. Для двуханодного стабилитрона рассчитать параметр $NU_{ст}$.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схемы измерения, таблицы и графики в соответствии с заданием.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изобразить графики распределения заряда, напряженности и потенциала в несимметричном переходе.
2. Перечислить механизмы пробоя $p-n$ -перехода. Описать процессы в переходе при различных видах пробоя.
3. Как влияет температура перехода на напряжение пробоя?
4. Дать определение коэффициента умножения.
5. Как зависит напряжение пробоя от концентрации примеси?
6. Изобразить ВАХ стабилитрона, дать определение параметров.
7. Пояснить принцип термокомпенсации $U_{ст}$.
8. Описать на примере исследуемых стабилитронов систему условных обозначений.
9. Особенности двуханодного стабилитрона.
10. Особенности стабистора.

Лабораторная работа № 3

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение конструкции и принципа действия биполярного транзистора, исследование статических характеристик кремниевого $n-p-n$ -транзистора в схеме с общей базой.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими $p-n$ -переходами и тремя электродами. Работа полупроводниковых транзисторов основана на движении носителей зарядов обоих типов – электронов и дырок, поэтому они называются биполярными. Назначение транзисторов – усиление электрической мощности. $P-n$ -переходы в биполярном транзисторе образуются на границах чередующихся слоев p - и n -типа монокристалла полупроводника. В зависимости от типа проводимости чередующихся слоев полупроводника различают биполярные транзисторы $p-n-p$ - и $n-p-n$ -типа. Упрощенная структура транзистора $n-p-n$ -типа показана на рис. 3.1.

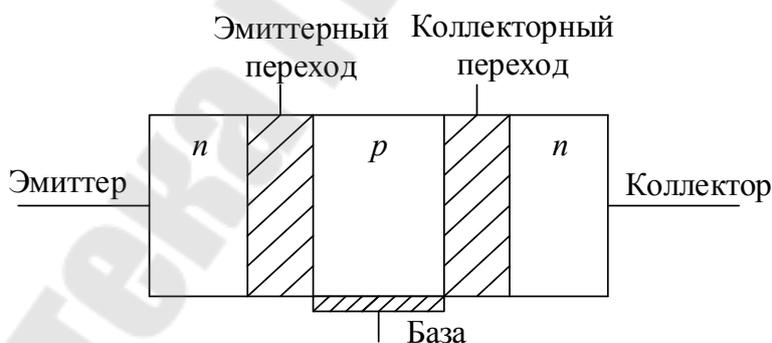


Рис. 3.1. Структура биполярного $n-p-n$ -транзистора

Области монокристалла через омические контакты соединены с соответствующими электродами (выводами) транзистора. Центральная область называется **базой**, а крайние – **эмиттером** и **коллектором**. Переход, образованный областями эмиттера и базы, называют эмиттерным $p-n$ -переходом, а переход между базой и коллектором – коллекторным переходом. У реальных транзисторов структура несимметрична, коллекторный переход имеет значительно большую площадь, чем

эмиттерный, а область эмиттера обладает наибольшей проводимостью благодаря высокой степени легирования примесью.

В нормальном режиме работы эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. Принцип действия биполярного транзистора основан на инжекции в базу неосновных носителей через прямосмещенный эмиттерный переход и экстракции прошедших через базу носителей коллекторным переходом. Для улучшения экстракции коллекторный переход имеет большую площадь по сравнению с эмиттерным, что позволяет собирать большую часть неосновных носителей, инжектированных в базу. По механизму движения носителей заряда (электронов или дырок) в базе биполярные транзисторы делятся на бездрейфовые и дрейфовые.

Бездрейфовые транзисторы изготавливаются методом сплавления и имеют однородную базу, поэтому механизм переноса носителей заряда – диффузия. Благодаря инжекции носителей из эмиттера у эмиттерного перехода концентрация неосновных носителей в базе больше по сравнению с равновесной, а у коллекторного перехода благодаря экстракции – меньше, поэтому инжектированные носители движутся от эмиттерного перехода к коллекторному через базу под действием градиента концентрации.

Дрейфовые транзисторы обычно получают методом диффузии примеси, поэтому база неоднородна, а примесь распределена таким образом, что инжектированные носители движутся в поле, образованном ионами примеси. Перенос носителей через базу обусловлен как диффузией, так и дрейфом в электрическом поле, но основное влияние оказывает дрейф, так как дрейфовая скорость больше диффузионной. Поэтому дрейфовые транзисторы обладают лучшими усилительными и частотными свойствами, чем бездрейфовые.

На рис 3.2 приведено условное графическое изображение биполярных транзисторов $n-p-n$ - и $p-n-p$ -типа с указанием направления токов в нормальном режиме.

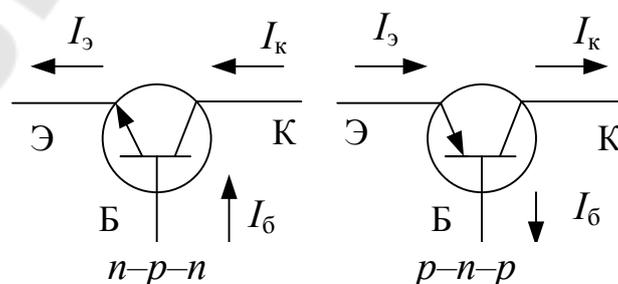


Рис. 3.2. Условное графическое изображение биполярных транзисторов

На рис. 3.3 приведена зонная диаграмма транзистора $n-p-n$ -типа в нормальном режиме работы с указанием направления движения носителей.

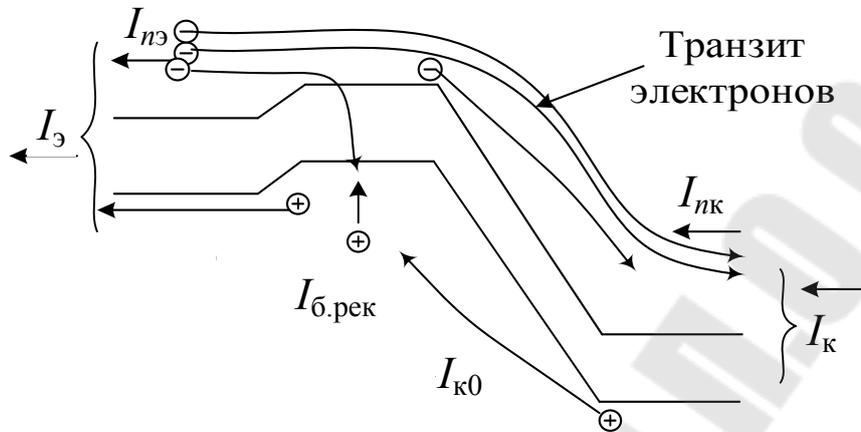


Рис. 3.3. Зонная диаграмма биполярного $n-p-n$ -транзистора

Эмиттерный переход смещен в прямом направлении, высота потенциального барьера эмиттерного перехода уменьшается, в базу из n -области эмиттера инжектируются электроны, а из базы p -типа в эмиттер инжектируются дырки. Так как область базы должна оставаться электрически нейтральной, избыток электронов, возникающих вследствие ухода дырок и прихода электронов через эмиттерный переход, компенсируется уходом электронов во внешнюю цепь через электрод базы. По мере движения инжектированных электронов к коллектору в базе p -типа часть из них рекомбинирует с дырками, что также для сохранения электрической нейтральности вызывает уход избыточных электронов во внешнюю цепь через базу.

Обратно – смещенный коллекторный переход захватывает электроны, инжектированные в базу – транзитный эффект.

Кроме того, через коллекторный переход протекает обратный ток, обусловленный движением неосновных носителей – дырок из коллектора n -типа и электронов из базы. Этот ток также протекает через электрод базы. Токи $n-p-n$ -транзистора показаны на рис. 3.4.

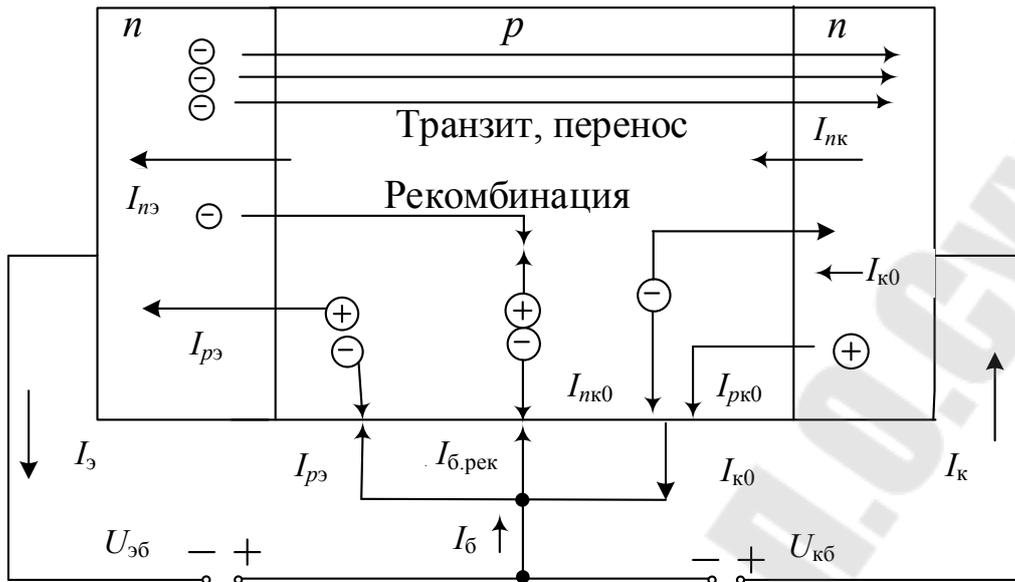


Рис. 3.4. Структура токов биполярного $n-p-n$ -транзистора

Аналогичные процессы протекают в $p-n-p$ -транзисторе (рис. 3.5).

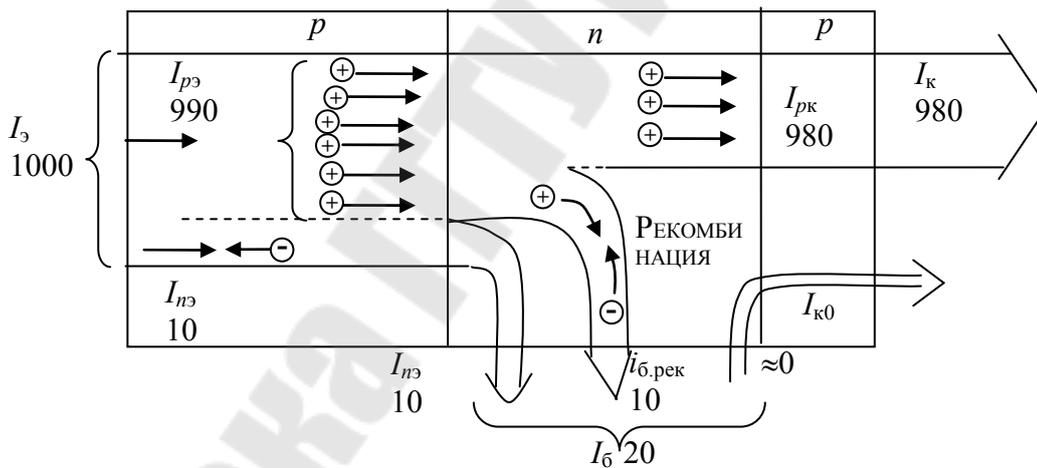


Рис. 3.5. Структура токов биполярного $p-n-p$ -транзистора:
 $I_э = I_{пэ} + I_{нэ}$ – ток p -эмиттера; $I_{пэ}$ – дырочная составляющая тока эмиттера; $I_{нэ}$ – электронная составляющая тока эмиттера

Коэффициент инжекции показывает долю полезной (дырочной для $p-n-p$) составляющей:

$$\gamma = \frac{I_{пэ}}{I_э} = \frac{I_{пэ}}{I_{пэ} + I_{нэ}} = \frac{1}{1 + I_{нэ}/I_{пэ}} \approx 1 - \frac{I_{нэ}}{I_{пэ}} = 1 - \frac{N_{дб}}{N_{аз}}$$

Если $N_{aэ} \gg N_{дб}$, например, $N_{дэ} = 100N_{дб}$, то

$$\gamma = \frac{990}{1000} = 0,99.$$

В транзисторе $p-n-p$ -типа полезная составляющая – дырочная. В транзисторе $n-p-n$ -типа полезная составляющая электронная. Поэтому необходимо условие $N_{дэ} \gg N_{аб}$.

Кроме потери электронной составляющей $I_{nэ}$, за счет рекомбинации дырок в n -базе возникает потеря на рекомбинацию.

$I_{б.рек}$ – рекомбинационная составляющая дырочного тока эмиттера.

$I_{рк}$ – транзитная составляющая тока эмиттера.

$$I_{рк} = I_{рэ} - I_{б.рек}$$

Коэффициент переноса показывает, какая часть дырочного тока эмиттера доходит до коллектора.

$$\mu = \frac{I_{рк}}{I_{рэ}} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w}{L_{рб}} \right)^2.$$

При $L_{рб} = 7w$, $\mu = 0,99$.

Пренебрегаем собственным обратным током коллекторного перехода $I_{к0}$.

Коэффициент передачи тока эмиттера:

$$\alpha = \frac{I_{к}}{I_{э}} = \frac{I_{рк}}{I_{э}} = \frac{I_{рэ}}{I_{э}} \frac{I_{рк}}{I_{рэ}} = \gamma\mu,$$

$$\alpha = \gamma\mu = 0,99 \cdot 0,99 = 0,98, \text{ или } \alpha = \frac{I_{к}}{I_{э}} = \frac{980}{1000} = 0,98.$$

В общем случае

$$\begin{cases} I_{э} = I_{рэ} + I_{nэ}; \\ I_{к} = I_{рк} + I_{к0}; \\ I_{б} = I_{nэ} + I_{б.рек} + I_{к0}. \end{cases} \quad \begin{cases} I_{к} = \alpha I_{э} + I_{к0}; \\ I_{б} = (1 - \alpha) I_{э} - I_{к0}; \\ I_{э} = I_{б} + I_{к}. \end{cases}$$

Коэффициент α – важнейший физический параметр биполярных транзисторов, определяется комплексом технологических параметров (материал, концентрации примесей, площади переходов, диф-

фузионная длина электронов и дырок и т. д.). Коэффициент α характеризует усилительные свойства транзисторов, и его значения для современных транзисторов находятся в диапазоне $0,95 < \alpha < 1$.

Для увеличения α необходимо увеличивать коэффициент инжекции γ , т. е. выполнять условие $N_{дэ} \gg N_{дб}$ – концентрация примеси в эмиттере на несколько порядков больше, чем в базе (база более высокоомная, чем эмиттер).

Кроме того, диффузионная длина L_p инжектированных зарядов в базе должна быть больше, чем толщина базы w . В базе на границе с эмиттерным переходом неравновесная концентрация неосновных зарядов за счет инжекции больше равновесной: $p_{nб}(0) \gg p_{nб0}$. На границе с коллекторным переходом неравновесная концентрация неосновных зарядов за счет экстракции близка к нулю: $p_{nб}(w) \approx 0$. При $L_p < w$ (рис. 3.6, а) инжектированные из эмиттера заряды рекомбинируют в базе и транзитный ток отсутствует. Ток коллектора равен обратному: $I_k = I_{к0}$.

При условии $L_p > w$ (рис. 3.6, б), наоборот, основная часть инжектированных зарядов проходит базу и захватывается полем коллекторного перехода – образует транзитный ток. Зависимость тока обратносмещенного коллекторного перехода от тока прямосмещенного эмиттерного перехода и есть суть биполярного транзистора.

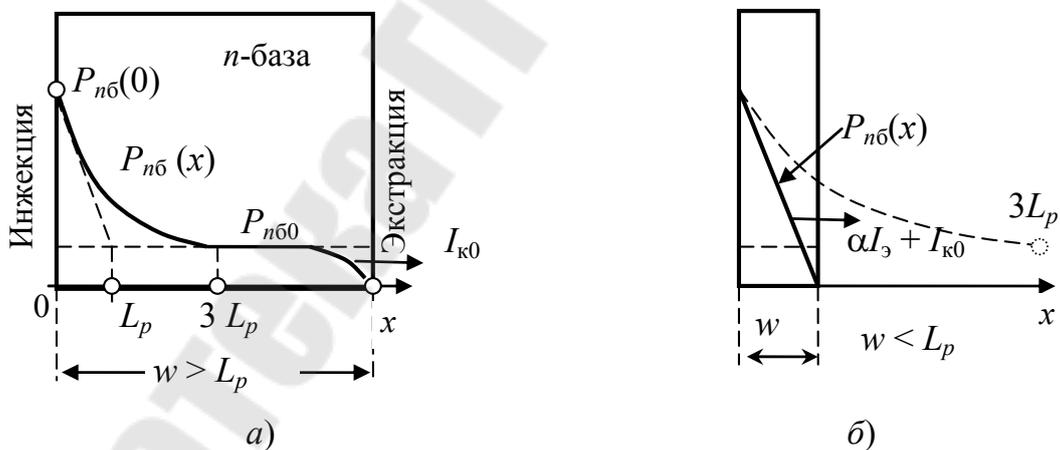


Рис. 3.6. Распределение зарядов в базе:
а – $L_p < w$; б – $L_p > w$

Увеличение коэффициента переноса за счет условия $L_p > w$ обеспечивается, во-первых, уменьшением w , во-вторых, увеличением L_p , т. е. увеличением времени жизни инжектированных зарядов. Последнее требует уменьшения концентрации основных зарядов (примеси) в базе.

Следовательно, высокое удельное сопротивление базы необходимо для увеличения обоих коэффициентов γ и μ .

Принцип действия биполярного транзистора кратко можно сформулировать как взаимодействие прямосмещенного эмиттерного $p-n$ -перехода и обратносмещенного коллекторного $p-n$ -перехода через слаболегированную тонкую базу, причем это взаимодействие проявляется в виде транзитного тока (рис. 3.7).

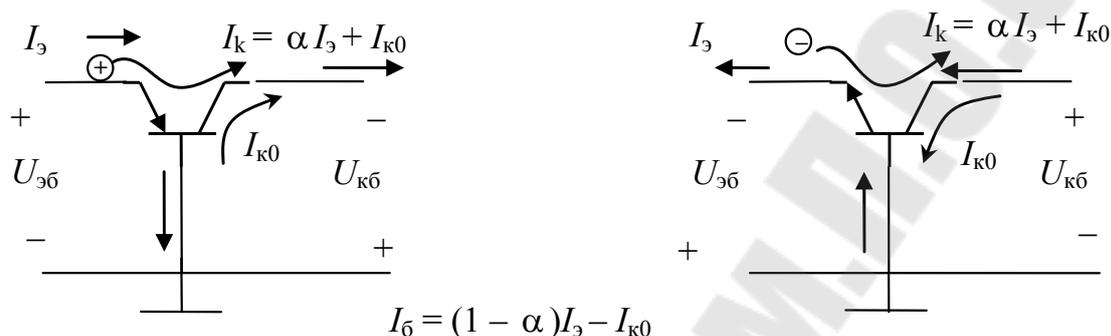


Рис. 3.7. Токи в биполярном транзисторе

Статическими характеристиками называют зависимости (графики), выражающие функциональную связь между токами и напряжениями транзистора. Наиболее распространены гибридные характеристики, в которых в качестве независимых переменных приняты входной ток и выходное напряжение:

$$U_{вх} = f(I_{вх}, U_{вых}),$$

$$I_{вых} = f(I_{вх}, U_{вых}).$$

Используются четыре семейства характеристик:

– входные характеристики: $U_{вх} = f(I_{вх})$, $U_{вых} = \text{const}$;

– выходные характеристики: $I_{вых} = f(U_{вых})$, $I_{вх} = \text{const}$;

– характеристики прямой передачи (по току): $U_{вых} = \text{const}$;
 $I_{вых} = f(I_{вх})$;

– характеристики обратной связи: $U_{вх} = f(U_{вых})$, $I_{вх} = \text{const}$.

Для транзистора, включенного по схеме с общей базой, входным электродом является эмиттер, а выходным – коллектор.

– входные характеристики: $U_{эб} = f(I_э)$, $U_{кб} = \text{const}$;

– выходные характеристики: $I_к = f(U_{кб})$, $I_э = \text{const}$;

– характеристики прямой передачи: $I_к = f(I_э)$, $U_{кб} = \text{const}$;

– характеристики обратной связи: $U_{эб} = f(U_{кб})$, $I_э = \text{const}$.

Для аналитического описания семейств статических характеристик транзисторов пользуются эквивалентной схемой или физической моделью. Широко используется модель Эберса–Мола (рис. 3.8), представляющая транзистор как совокупность двух встречноключенных взаимодействующих $p-n$ -переходов. Взаимодействие переходов заключается в собирании одним из переходов носителей, инжектированных другим переходом. Поэтому кроме двух встречноключенных диодов физическая модель транзистора содержит два источника тока.

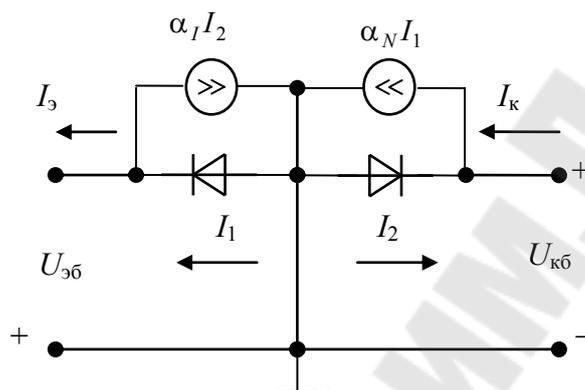


Рис. 3.8. Эквивалентная схема транзистора – модель Эберса–Мола: I_1 , I_2 – собственные токи эмиттерного и коллекторного переходов; $\alpha_N I_1$ – транзитная составляющая тока эмиттера (индекс N – нормальный режим); $\alpha_I I_2$ – транзитная составляющая тока коллектора (индекс I – инверсный режим), $\alpha_N > \alpha_I$

Первый закон Кирхгофа:

$$I_3 = I_1 - \alpha_I I_2,$$

$$I_к = \alpha_N I_1 - I_2,$$

$$I_3 = I_б + I_к.$$

Идеализированные ВАХ эмиттерного и коллекторного $p-n$ -переходов:

$$I_1 = I'_{30} (e^{U_{эб}/\varphi_T} - 1), \quad I_2 = I'_{к0} (e^{U_{кб}/\varphi_T} - 1).$$

I'_{30} – обратный (тепловой) ток эмиттера при коротком замыкании коллекторного перехода.

$I'_{к0}$ – обратный (тепловой) ток коллектора при КЗ эмиттерного перехода.

На практике используют режим холостого хода.

$I_{\varepsilon 0} = (1 - \alpha_I \alpha_N) I'_{\varepsilon 0}$ – обратный ток эмиттера при ХХ коллекторного перехода.

$I_{\kappa 0} = (1 - \alpha_I \alpha_N) I'_{\kappa 0}$ – обратный ток коллектора при ХХ эмиттерного перехода.

Точность применения модели Эберса–Молла определяется точностью определения параметров конкретного транзистора $I_{\varepsilon 0}$, $I_{\kappa 0}$, α_N , α_I . При этом следует учитывать идеализацию модели – не учтены объемные сопротивления слоев, нелинейность параметров, пробой переходов и т. д.

Система уравнений Эберса–Молла:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\varepsilon} = \frac{I_{\varepsilon 0}}{1 - \alpha_I \alpha_N} (e^{U_{\varepsilon \delta} / \varphi_T} - 1) - \frac{\alpha_I I_{\kappa 0}}{(1 - \alpha_I \alpha_N)} (e^{U_{\kappa \delta} / \varphi_T} - 1); \\ I_{\kappa} = \frac{\alpha_N I_{\varepsilon 0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} (e^{U_{\varepsilon \delta} / \varphi_T} - 1) - \frac{I_{\kappa 0}}{1 - \alpha_I \alpha_N} (e^{U_{\kappa \delta} / \varphi_T} - 1); \\ \alpha_N I_{\varepsilon 0} = \alpha_I I_{\kappa 0}; \\ I_{\delta} = I_{\varepsilon} - I_{\kappa}. \end{array} \right.$$

Семейство входных ВАХ (рис. 3.9):

$$U_{\varepsilon \delta} = \varphi_T \cdot \ln \left[\frac{I_{\varepsilon}}{I'_{\varepsilon 0}} + 1 + \alpha_N (e^{U_{\kappa \delta} / \varphi_T} - 1) \right].$$

При $U_{\kappa \delta} = 0$ $I_{\varepsilon} = I'_{\varepsilon 0} (e^{U_{\varepsilon \delta} / \varphi_T} - 1)$, $U_{\varepsilon \delta} = \varphi_T \cdot \ln(I_{\varepsilon} / I'_{\varepsilon 0} + 1)$.

В этом случае имеем ВАХ идеализированного эмиттерного перехода, $I'_{\varepsilon 0}$ – тепловой ток эмиттера при КЗ коллектора.

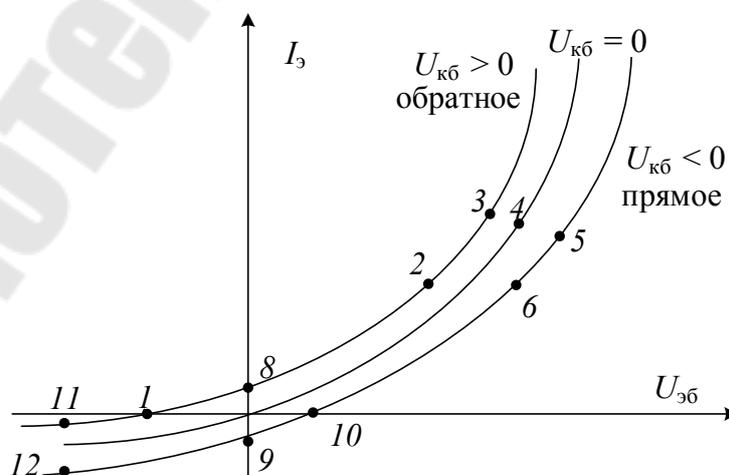


Рис. 3.9. Семейство входных характеристик

Вторая ВАХ семейства приводится при обратном напряжении на коллекторе. $U_{кб} = +5$ В ($n-p-n$), $U_{кб} = -5$ В ($p-n-p$), $e^{U_{кб}/\varphi_T} \rightarrow 0$,

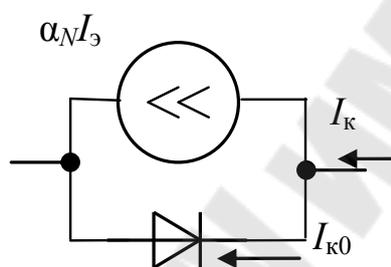
$$I_э = I'_{э0}(e^{U_{эб}/\varphi_T} - 1) + \alpha_N I'_{э0}.$$

По сравнению с предыдущим случаем ток эмиттера незначительно увеличивается и, в частности, при $U_{эб} = 0$, $I_э = +\alpha_N I'_{э0}$.

В случае прямого напряжения на коллекторе ВАХ сильно зависят от величины параметра, так как ток эмиттера содержит встречную транзитную составляющую (режим насыщения и инверсный).

Семейство выходных ВАХ (рис. 3.10):

$$I_к = \alpha_N I_э - I_{к0}(e^{U_{кб}/\varphi_T} - 1).$$



При $I_э = 0$ через коллектор протекает обратный ток перехода $I_к = I_{к0}$. Зависимость $I_к = f(U_{кб})$ представляет собой вольт-амперную характеристику коллекторного перехода с резким возрастанием тока коллектора при изменении знака $U_{кб}$ (прямом смещении). При построении выходных ВАХ первый (основной) квадрант соответствует обратным напряжениям на коллекторе.

$$I_к = \alpha I_э + I_{к0}.$$

В первом квадранте идеализированная модель Эберса–Молла имеет две особенности:

– при $U_{кб} > 0,2$ В $\gg \varphi_T$ $I_к \neq f(U_{кб})$ – графики – горизонтальные прямые;

– кривые эквидистантны: постоянные приращения параметра $\Delta I_э$ вызывают постоянные приращения функции $\Delta I_к = \alpha \Delta I_э$.

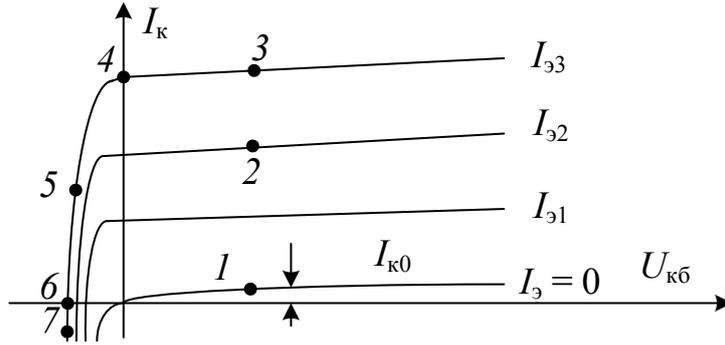


Рис. 3.10. Семейство выходных характеристик

В зависимости от знаков напряжений на переходах и направлений токов транзистора различают четыре режима работы:

- 1) нормальный режим: $U_{эб} < 0$, $U_{кб} > 0$ – эмиттерный переход смещен в прямом направлении, коллекторный – в обратном;
- 2) режим отсечки: $U_{эб} > 0$, $U_{кб} > 0$ – оба перехода закрыты;
- 3) режим насыщения: $U_{эб} < 0$, $U_{кб} < 0$ – оба перехода открыты;
- 4) инверсный режим: $U_{эб} > 0$, $U_{кб} < 0$.

Для $p-n-p$ -транзистора полярности напряжений обратные по знаку. На рис. 3.11 приведены равновесное $n_{б0}$ и неравновесное $n_{б}(x)$ распределение неосновных носителей (электронов) в базе p -типа.

В нормальном режиме работы эмиттерный переход смещен в прямом направлении, граничная концентрация инжектированных носителей намного больше равновесной. Коллекторный переход смещен в обратном направлении, граничная концентрация меньше равновесной.

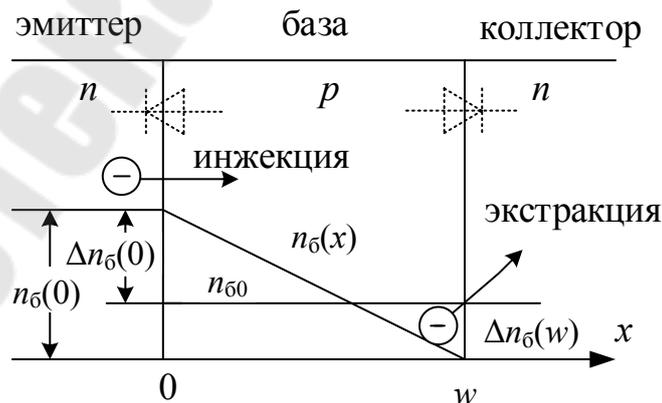


Рис. 3.11. Равновесное и неравновесное (нормальный режим) распределение носителей в базе транзистора

Так как толщина базы значительно меньше диффузионной длины электронов: $w \ll L_n$, то распределение инжектированных носителей в базе практически линейно для нормального режима работы.

На рис. 3.12 приведено распределение неосновных носителей заряда в базе для различных режимов работы. Каждое распределение соответствует указанным точкам на входных и выходных характеристиках.

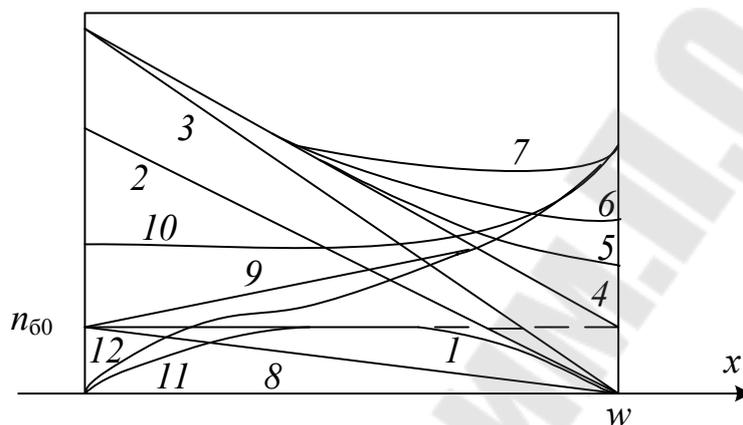


Рис. 3.12. Распределение носителей заряда в базе для различных режимов работы транзистора:
 1, 11 – режим отсечки; 2, 3 – нормальный режим;
 4 – граничный режим между нормальным и насыщением;
 5–7, 10 – режим насыщения; 8 – граничный между нормальным и отсечкой; 9 – граничный между инверсным и насыщением; 12 – инверсный режим

3. СХЕМА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследуются характеристики кремниевого эпитаксиально-планарного $n-p-n$ -транзистора КТ201. Основные параметры:

Обратный ток коллектора при $U_{кб} = 20$ В $I_{к0} < 1$ мкА

Обратный ток эмиттера при $U_{эб} = 20$ В $I_{э0} < 3$ мкА

Коэффициент обратной связи по напряжению в режиме малого сигнала при $I_э = 1$ мА, $U_{кб} = 5$ В $h_{12б} < 0,003$

Статический коэффициент передачи тока в схеме ОЭ при $I_к = 5$ мА, $U_{кб} = 1$ В $h_{21э} = 60-90$

Граничная частота коэффициент передачи тока в схеме ОЭ при $I_э = 10$ мА, $U_{кб} = 5$ В $f_{гр} > 10$ МГц

Выходная проводимость в режиме малого сигнала в схеме ОЭ при $I_э = 1$ мА, $U_{кб} = 5$ В $h_{22э} < 2$ мкСм

Предельные эксплуатационные параметры:

Постоянные напряжения $U_{кб}$, $U_{кэ}$, $U_{эб}$ > 20 В

Постоянный ток коллектора $I_{к} = 20$ мА

Импульсный ток коллектора при скважности $Q > 10$ $I_{к} = 100$ мА

Постоянная рассеиваемая мощность $R_{к} = 150$ мВт

Температура перехода $T_{п} = 150$ °С

Температура окружающей среды $-60 \div +125$ °С

Тепловое сопротивление
переход – окружающая среда 556 °С/Вт

Схема эксперимента приведена на рис. 3.13.

Прямое смещение переходов осуществляется при подаче отрицательного напряжения на электроды эмиттера или коллектора. Прямое смещение задавать только с включенным последовательно резистором $R = 620$ Ом. Режим $U = 0$ задается с помощью короткого замыкания соответствующего электрода на общий вывод (базу), а режим $I = 0$ – путем обрыва (холостого хода) вывода.

Пределы измерения мультиметров устанавливать такими, чтобы получать отсчет трех значащих цифр, например, 0,655 В или 655 мВ.

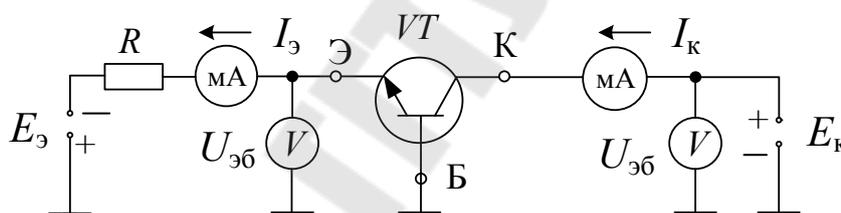


Рис. 3.13. Схема эксперимента

4. ПОРЯДОК РАБОТЫ

4.1. Собрать схему эксперимента.

4.2. Снять зависимость $I_{к}$ от $I_{э}$ (характеристику прямой передачи) при $U_{к} = 0; -0,2$ В; $+5$ В. Рассчитать коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha_N = \frac{I_{к}}{I_{э}}$.

Таблица 3.1

$U_{к} =$

$I_{э},$ мА	0	0,1	0,5	1	2	4	6	8	10
$I_{к},$ мА									
α_N									

4.3. Снять зависимости $I_э = f(I_к)$ при $U_э = +5$ В. Для перехода в инверсный режим поменять местами точки подключения Э и К.

Рассчитать инверсный коэффициент передачи тока $\alpha_I = \frac{I_э}{I_к}$.

Таблица 3.2

$I_к, \text{мА}$	0	0,1	0,5	1	2	4	6	8	10
$I_э, \text{мА}$									
α_I									

4.4. Снять семейство выходных (коллекторных) характеристик при $I_э = 2; 4; 6; 8; 10$ мА. При $I_э = 6$ мА снять характеристику обратной связи – зависимость $U_э = f(U_к)$ при $I_э = \text{const}$. При проведении эксперимента установить заданное значение $I_э$ при $U_к = 0$, затем при увеличении $U_к$ поддерживать $I_э$ постоянным.

Таблица 3.3

		$U_к, \text{В}$	0	0,1	0,2	0,5	1	2	4	5	6	8	10
$I_э, \text{мА}$	2	$I_к, \text{мА}$											
	4	$I_к, \text{мА}$											
	6	$I_к, \text{мА}$											
	6	$U_э, \text{В}$											
	8	$I_к, \text{мА}$											
	10	$I_к, \text{мА}$											

4.5. Снять семейство входных (эмиттерных) характеристик при $U_к = 0; +5$ В.

Таблица 3.4

		$I_э, \text{мА}$	0	0,1	0,2	1	2	4	6	8	10
$U_к, \text{В}$	0	$U_э, \text{В}$									
	+5										

4.6. По результатам п. 4.2 построить характеристики прямой передачи тока $I_к = f(I_э)$ для трех значений $U_к$.

4.7. По результатам пп. 4.2 и 4.3 построить на одном графике зависимости $\alpha = f(I_э)$ и $\alpha_I = f(I_э)$.

4.8. Построить семейство выходных характеристик.

4.9. Построить семейство входных характеристик.

4.10. Построить характеристику обратной связи.

Рассчитать коэффициент обратной связи $\mu_{\text{эк}} = \frac{\Delta U_{\text{э}}}{\Delta U_{\text{к}}}$.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать краткие теоретические сведения, аналитическое описание входных и выходных характеристик, схему эксперимента, результаты эксперимента, расчеты и графики.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить движение зарядов и образование основных составляющих токов в нормальном режиме:

а) в транзисторе $n-p-n$ -типа; б) в транзисторе $p-n-p$ -типа.

2. Как связаны граничные концентрации неосновных носителей в базе с напряжениями на переходах?

3. Как связаны токи через переходы с градиентами граничных концентраций неосновных носителей в базе?

4. Что такое коэффициент инжекции?

5. Какой физический смысл имеет коэффициент переноса?

6. Как определяется теоретически и экспериментально коэффициент передачи тока эмиттера?

7. Привести схемы включения транзистора.

8. Привести модель Эберса–Молла.

9. Какие режимы работы транзистора существуют?

10. Изобразить распределение неосновных носителей в базе для различных режимов работы.

11. Указать направления токов и знаки потенциалов на электродах в различных режимах работы: а) транзистора $n-p-n$ -типа; б) транзистора $p-n-p$ -типа.

12. Привести выражение для выходных характеристик.

13. Привести выражения для входных характеристик.

14. Объяснить влияние напряжения $U_{\text{к}}$ на входные характеристики.

15. Объяснить влияние $I_{\text{э}}$ на выходные характеристики.

16. Описать характеристики обратной связи.

17. Объяснить влияние $U_{\text{к}}$ на коэффициент передачи тока эмиттера.

18. Объяснить отличие реальных характеристик от характеристик идеализированного транзистора.

Лабораторная работа № 4

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное исследование статических характеристик $n-p-n$ -транзистора в схеме ОЭ, определение коэффициента передачи тока базы и исследование его зависимости от режима работы.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В схеме включения ОЭ входным электродом транзистора является база, а выходом – коллектор. На рис. 4.1 приведена структура транзистора в схеме ОЭ с указанием направления движения носителей заряда и токов в активном режиме.

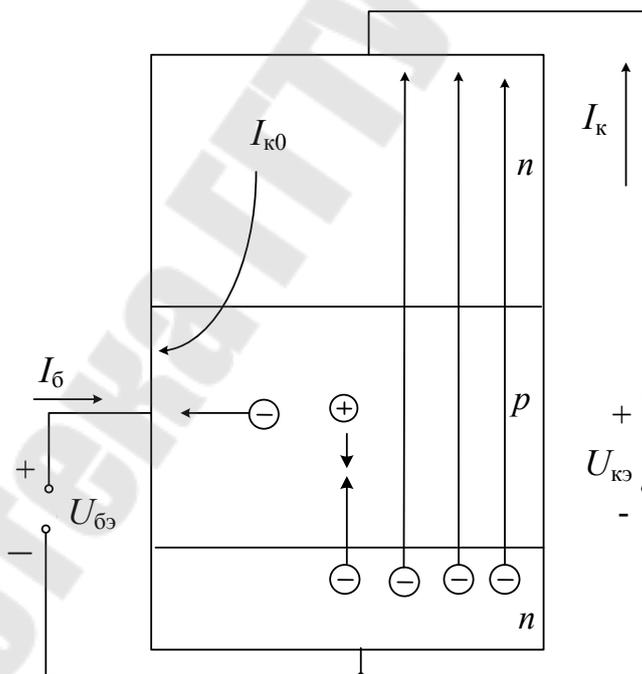


Рис. 4.1. Активный режим транзистора в схеме с общим эмиттером

Для транзистора $n-p-n$ -типа эмиттерный переход смещен в прямом направлении при $U_{бэ} > 0$, коллекторный переход смещен в обратном направлении при $U_{кэ} < 0$ или $U_{кб} > 0$. Так как все потенциалы

отсчитываются от общего электрода – эмиттера, то в схеме ОЭ вместо напряжения $U_{кб}$ используется $U_{кэ} = U_{кб} + U_{кэ}$. При больших обратных напряжениях ($U_{кб} > 3$ В) можно считать $U_{кэ} = U_{кб}$, так как напряжение на прямосмещенном переходе $U_{кэ}$ мало. Электроны из эмиттера через эмиттерный переход инжектируются в базу, захватываются полем коллекторного перехода и образуют ток коллектора. Часть электронов рекомбинирует с дырками p -слоя базы, избыточные электроны уходят во внешнюю цепь и образуют ток базы. Кроме того, через обратносмещенный коллекторный переход протекает обратный ток коллектора $I_{к0}$.

В активном режиме из модели Эберса–Молла получена зависимость между током коллектора и эмиттера:

$$I_k = \alpha I_{э} - I_{к0} (e^{U_{кб}/\varphi_T} - 1), \quad (1)$$

где α – коэффициент передачи тока эмиттера.

Выходные ВАХ транзистора в схеме ОЭ – зависимости тока коллектора от напряжения $U_{кэ}$ при заданном входном токе $I_{б}$:

$$I_k = f(U_{кэ}) \text{ при } I_{б} = \text{const}. \quad (2)$$

Учитывая, что $U_{э} = U_{к} + U_{б}$ и при больших напряжениях на коллекторе $U_{кэ} = U_{кб}$, получим из (1) аналитическое выражение выходных характеристик:

$$I_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{б} - \frac{I_{к0}}{1-\alpha} (e^{U_{кэ}/\varphi_T} - 1) \quad (3)$$

и при обратном напряжении $|U_{кэ}| \gg \varphi_T$:

$$I_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{б} + \frac{I_{к0}}{1-\alpha}.$$

Коэффициент $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \gg 1$ называется коэффициентом передачи тока базы.

$$I_k = \beta I_{б} + I_{кэ0}. \quad (4)$$

Обратный ток коллектора в схеме ОЭ в $(1 + \beta)$ раз больше, чем в схеме ОБ:

$$I_{кэ0} = I_{к0}^* = (1 + \beta) I_{к0}.$$

Различают интегральный коэффициент передачи тока базы $\beta = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}}$ и дифференциальный:

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} = h_{21э}.$$

Семейство выходных характеристик приведено на рис. 4.2.

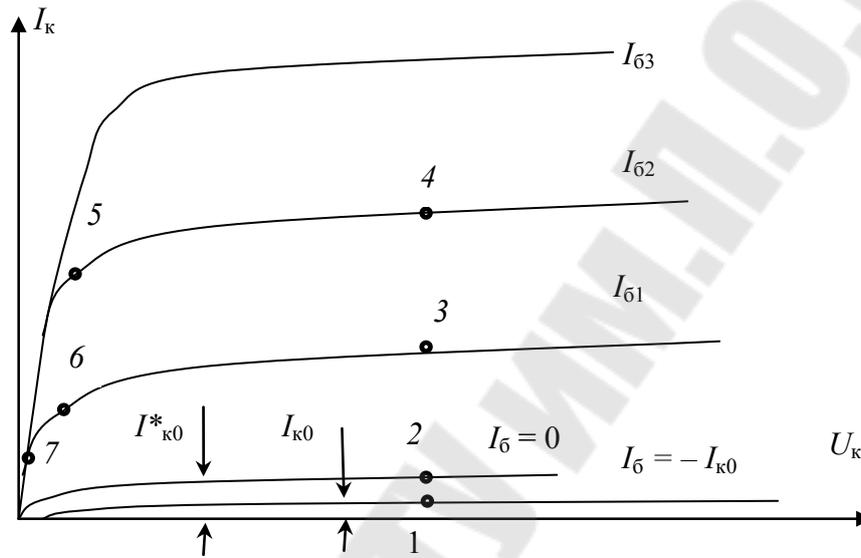


Рис. 4.2. Выходные характеристики

При $I_{\text{б}} = 0$ (обрыв базы) ток коллектора равен $I_{\text{к}0}^* = I_{\text{к}0}(1 + \beta)$. Это объясняется тем, что напряжение $U_{\text{кэ}}$ частично приложено к эмиттерному переходу. Дырки, проникающие через коллекторный переход в базу, заряжают область базы положительно, эмиттерный переход смещается в прямом направлении, ток транзистора возрастает. Минимальный ток коллектора $I_{\text{к}0}$ достигается при $I_{\text{б}} = -I_{\text{к}0}$, что соответствует схеме ОБ и $I_{\text{э}} = 0$.

С увеличением тока базы ток коллектора возрастает. В схеме ОЭ характеристики имеют значительно больший наклон (сильнее зависит от $U_{\text{кэ}}$), чем в схеме ОБ. При увеличении обратного напряжения на коллекторном переходе ширина перехода возрастает, толщина базы уменьшается, количество рекомбинируемых электронов уменьшается, и при $I_{\text{б}} = \text{const}$ ток $I_{\text{к}}$ возрастает вследствие увеличения α и β . Особенностью выходных характеристик по сравнению со схемой ОБ является их расположение только в I квадранте. Это объясняется тем,

что коллекторный переход смещен в прямом направлении и транзистор переходит в режим насыщения при $U_{кб} = 0$, а так как на базе положительный потенциал, то уменьшение тока коллектора наступает при $U_{кэ} = U_{кб} + U_{бэ} = U_{бэ} > 0$. Чем больше ток коллектора, тем при большем напряжении на коллекторе происходит переход из активной области в область насыщения.

Входные характеристики транзистора: $I_{б} = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ приведены на рис. 4.3.

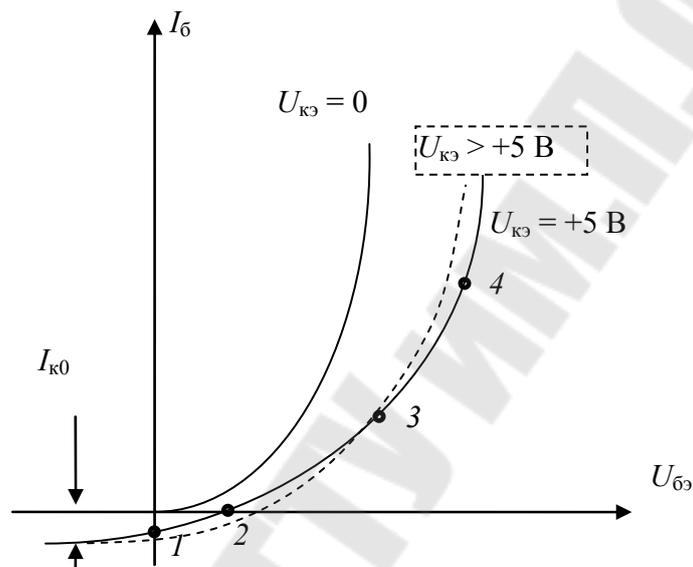


Рис. 4.3. Входные характеристики

В справочнике приводят входные характеристики для двух значений коллекторных напряжений: $U_{кэ} = 0$, $U_{кэ} = 5 \text{ В}$ (иногда 10 В). При $U_{кэ} = 0$ входная характеристика соответствует ВАХ двух параллельно включенных $p-n$ -переходов с относительно большим током базы при положительном $U_{бэ}$, что соответствует повышенной рекомбинации в базе в режиме насыщения. При $U_{кэ} = 5 \text{ В}$ носители, инжектированные в базу, захватываются полем коллекторного перехода, коэффициенты α и β возрастают, ток базы значительно меньше, чем при $U_{кэ} = 0$. При $U_{бэ} = 0$ ток базы равен обратному току коллектора (т. 1). При некотором значении $U_{бэ}$ вытекающий ток базы $I_{к0}$ компенсируется втекающим током рекомбинации (из-за увеличения $I_{э}$ и $I_{к}$), суммарный ток базы равен 0 (т. 2).

Дальнейшее увеличение $U_{кэ}$ может привести как к уменьшению, так и к увеличению тока базы при постоянном $U_{бэ}$ (пунктир).

Обычно при малых $U_{бэ}$ график сдвигается вниз из-за увеличения $I_{к0}$.

При больших значениях $U_{бэ}$ график сдвигается вверх. Это объясняется тем, что при увеличении $U_{кэ}$ часть напряжения падает на эмиттерном переходе, ток $I_э$ возрастает, рекомбинационная составляющая тока базы увеличивается.

Практически $U_{кэ}$ в активном режиме влияет незначительно, можно считать, что семейство входных характеристик при $U_{кэ} > 2$ В совпадает с графиком для $U_{кэ} = 5$ В.

На рис. 4.4 приведены распределения неосновных носителей в базе транзистора для режимов, указанных на входных и выходных характеристиках.

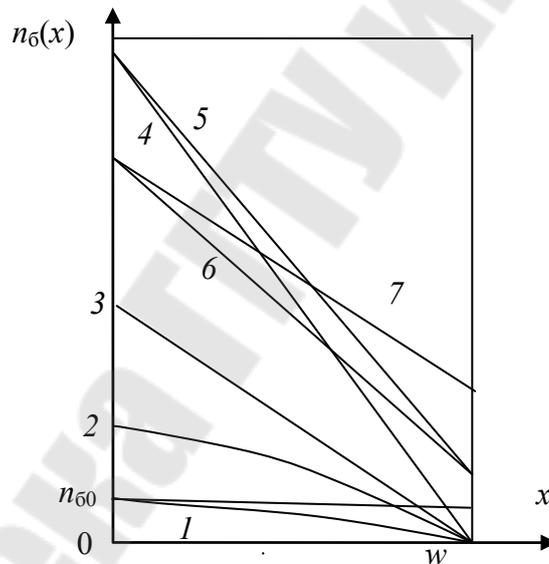


Рис. 4.4. Распределение неосновных носителей заряда в базе:

- 1 – режим осечки: $U_{бэ} = 0, I_б = -I_{к0}, I_к = I_{к0}$;
- 2 – обрыв базы: $I_б = 0, I_к = I_{к0}^*, U_{бэ} > 0$;
- 3, 4 – активный режим: $U_{бэ} > 0, U_{кэ} > U_{бэ}, U_{кб} > 0$;
- 5, 6 – граничный режим: $U_{бэ} > 0, U_{кэ} = U_{бэ}, U_{кб} = 0$;
- 7 – режим насыщения: $U_{бэ} > 0, U_{кб} > 0, U_{кэ} < U_{бэ}$

На рис. 4.5 приведена зависимость коэффициента передачи тока базы от тока эмиттера для различных $U_{кэ}$.

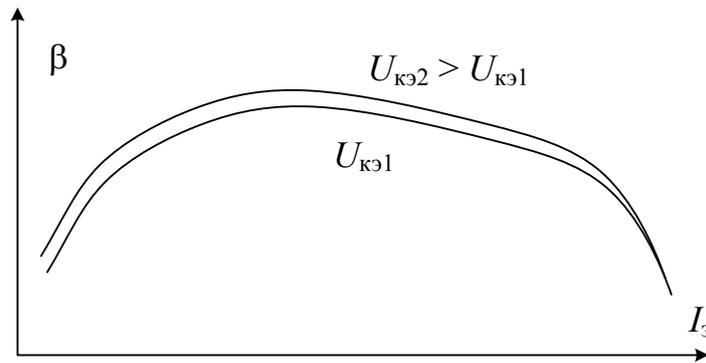


Рис. 4.5. Зависимость β от режима работы

В области малых токов эмиттера (коллектора) обратный ток коллектора (неуправляемая током базы часть I_{κ}) соизмерим с управляемым током и рекомбинационным током базы, коэффициент β относительно мал. Кроме того, при малых токах влияет поверхностная и объемная (на ловушках и дефектах структуры) рекомбинации. В области больших токов концентрация носителей заряда в базе возрастает, проводимость базы уменьшается. Это приводит к уменьшению α и β . При больших обратных напряжениях на коллекторе β увеличивается благодаря улучшению экстракции и росту коэффициента переноса.

3. МЕТОДИКА И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема эксперимента приведена на рис. 4.6.

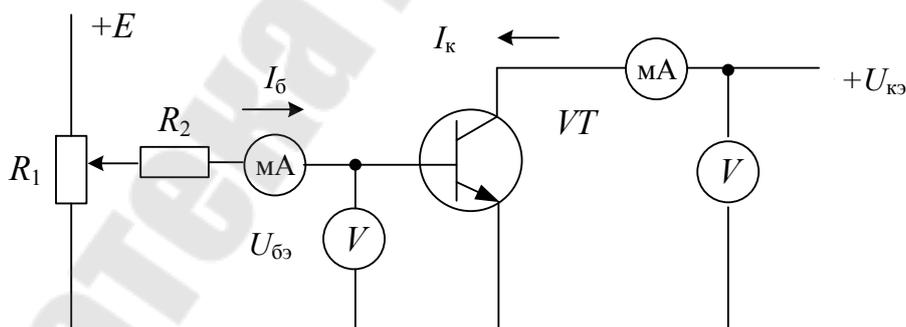


Рис. 4.6. Схема эксперимента

При снятии выходных характеристик $I_{\kappa} = f(U_{\kappa\epsilon})$ контролировать и поддерживать с помощью потенциометра R_1 постоянный ток базы, изменять $U_{\kappa\epsilon}$ и измерять I_{κ} . На линейных участках ВАХ, где зависимость I_{κ} от изменения напряжения $U_{\kappa\epsilon}$ слабая, $U_{\kappa\epsilon}$ изменять на 2÷3 В, на нелинейных – на 0,1–0,2 В.

При снятии входных характеристик задавать ток $I_{\bar{c}}$ и измерять $U_{\bar{c}\bar{a}}$, поддерживая $U_{\bar{c}\bar{э}} = \text{const}$. Ориентировочные значения резисторов $R_1 = 1 \div 3 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \div 100 \text{ кОм}$. Не допускать подачу на коллектор отрицательного напряжения.

4. ЗАДАНИЕ

4.1. Собрать схему эксперимента.

4.2. Установить $U_{\bar{c}\bar{э}} = +10 \text{ В}$ и определить ток базы $I_{\bar{б}\bar{м}}$, при котором $I_{\bar{к}} = 10 \text{ мА}$. Округлить значение $I_{\bar{б}\bar{м}}$ до двух значащих цифр.

4.3. Снять семейство выходных характеристик при фиксированных токах базы $I_{\bar{б}1} = 0,25I_{\bar{б}\bar{м}}$, $I_{\bar{б}2} = 0,5I_{\bar{б}\bar{м}}$, $I_{\bar{б}3} = 0,75I_{\bar{б}\bar{м}}$, $I_{\bar{б}4} = I_{\bar{б}\bar{м}}$ (табл. 4.1).

Таблица 4.1

$U_{\bar{c}\bar{э}}, \text{ В}$		0	0,1	0,2	...	1	2	4	6	8	10
$I_{\bar{б}1}, \text{ мкА}$	$I_{\bar{к}}, \text{ мА}$										
$I_{\bar{б}2}, \text{ мкА}$											
$I_{\bar{б}3}, \text{ мкА}$											
$I_{\bar{б}4}, \text{ мкА}$											

4.4. Снять семейство входных характеристик для $U_{\bar{c}\bar{э}} = 0, +5, +10 \text{ В}$. Токи базы задавать аналогично п. 4.3 (табл. 4.2).

Таблица 4.2

$I_{\bar{б}}, \text{ мкА}$		$I_{\bar{б}1}$	$I_{\bar{б}2}$	$I_{\bar{б}3}$	$I_{\bar{б}4}$
$U_{\bar{c}\bar{э}} = 0$	$U_{\bar{б}\bar{э}}, \text{ В}$				
$U_{\bar{c}\bar{э}} = +5 \text{ В}$					
$U_{\bar{c}\bar{э}} = +10 \text{ В}$					

4.5. Построить графики входных и выходных характеристик.

4.6. По результатам п. 4.4. построить характеристику прямой передачи $I_{\bar{к}} = f(I_{\bar{б}})$ для $U_{\bar{c}\bar{э}} = 5 \text{ В}$.

4.7. Для режима $I_{\bar{б}2} = 0,5I_{\bar{б}\bar{м}}$ и $U_{\bar{c}\bar{э}} = +6 \text{ В}$ рассчитать интегральный и дифференциальный коэффициенты передачи тока базы.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать теоретические положения, схему эксперимента, результаты опытов, расчетов и графики.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить движение носителей заряда через транзистор в активном режиме в схеме ОЭ для $p-n-p$ - и $n-p-n$ -транзисторов.
2. Как влияет $U_{кэ}$ на выходные характеристики?
3. Как влияет $U_{кэ}$ на входные характеристики?
4. Дать определение коэффициента передачи тока базы.
5. Объяснить зависимость коэффициента β от режима работы.
6. Привести распределение неосновных носителей заряда в базе для различных режимов работы.
7. Почему ток коллектора при обрыве базы больше, чем ток коллектора при обрыве эмиттера в схеме ОБ?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С p - n -ПЕРЕХОДОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с конструкцией и принципом действия полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом, экспериментальное исследование статических стоковых и сток-затворных характеристик транзистора с p - n -переходом и каналом n -типа, определение основных параметров транзистора.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Полевые транзисторы – это полупроводниковые приборы, в которых управление током, протекающим между двумя электродами, осуществляется напряжением, приложенным к третьему электроду.

В полевом транзисторе носителями заряда являются носители только одного типа (дырки или электроны), поэтому такие приборы часто называют **униполярными**. Управление величиной тока осуществляется за счет изменения удельной проводимости и площади полупроводникового слоя – канала – с помощью электрического поля. В зависимости от типа проводимости канала различают транзисторы с каналом n -типа и транзисторы с каналом p -типа. Управляющий электрод изолируется от канала с помощью диэлектрика (окисла кремния) или с помощью обратносмещенного p - n -перехода. Конструктивное выполнение полевого транзистора с p - n -переходом и каналом n -типа приведено на рис. 5.1. Транзистор изготовлен на основе кристалла кремния n -типа проводимости. На торцах кристалла расположены электроды. Электрод, от которого начинается движение носителей (в канале n -типа – электроны), называется истоком, а электрод, к которому движутся носители – стоком. Для того чтобы носители двигались от истока к стоку, на сток транзистора с n -каналом нужно подать положительное напряжение относительно истока. С боковых сторон кристалла путем легирования акцепторной примесью образованы области p -типа. Электрод, связанный с областями p -типа, называется затвором.

Между каналом n -типа и слоями p -типа образуются p - n -переходы – области объемных зарядов ионов примеси, обедненные подвижными носителями заряда и обладающие поэтому низкой проводимостью. Ширина канала определяется в соответствии с рис. 5.1:

$$w = a - 2l, \quad (1)$$

где a – расстояние между слоями p -типа; l – ширина p - n -перехода.

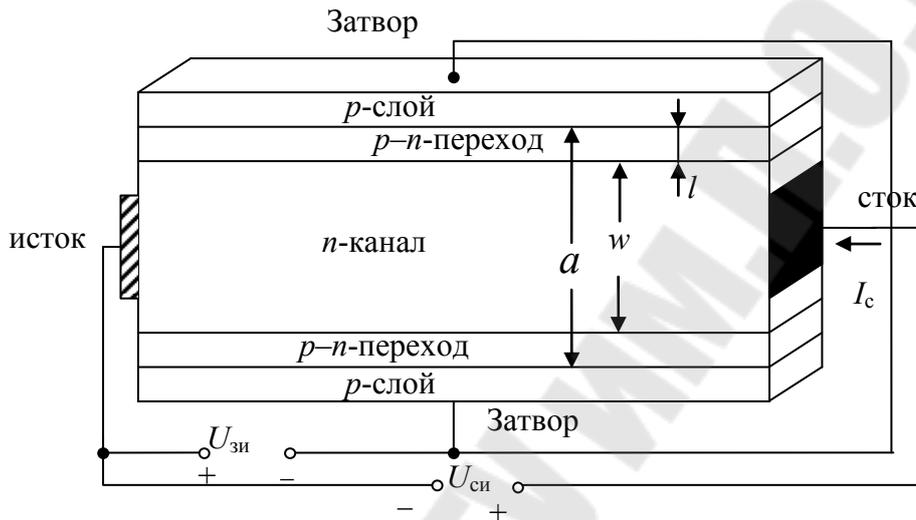


Рис. 5.1. Конструкция полевого транзистора с p - n -переходом

Концентрация примеси в p -слое значительно (на несколько порядков) больше, чем в n -канале, поэтому p - n -переход распространяется в n -слой и его ширина:

$$l = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\Delta\phi_0 + U_{зи})}{qN_d}}, \quad (2)$$

ширина проводящего слоя-канала:

$$w = a - 2\sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\Delta\phi_0 + U_{зи})}{qN_d}}. \quad (3)$$

При увеличении отрицательного напряжения на затворе ширина канала уменьшается и при некотором напряжении становится равной нулю – обедненные слои смыкаются между собой и проводящий канал перекрывается. Напряжение затвора, при котором канал перекрывается и проводимость канала близка к нулю (ток отсекается), называется напряжением отсечки $U_{зиотс}$. Если к затвору приложить

положительное напряжение относительно истока, то ширина p - n -переходов уменьшается, а ширина w и проводимость канала возрастают. Возможное положительное значение $U_{зи}$ составляет 0,2–0,3 В, так как при больших напряжениях открываются p - n -переходы, резко увеличивается ток затвора. Для транзисторов с p - n -переходом и каналом n -типа рабочие напряжения на затворе $U_{зиотс} \leq U_{зи} \leq 0$, а для транзисторов с каналом p -типа $U_{зиотс} > 0$ и $0 \leq U_{зи} \leq U_{зиотс}$.

Если приложить к стоку относительно истока положительное напряжение, то через канал начинает протекать ток за счет движения электронов от истока к стоку. При постоянном напряжении на затворе потенциал канала относительно затвора становится более положительным. У истока напряжение на p - n -переходе равно $U_{зи}$, а у стока $U_{зс} = U_{зи} - U_{си}$.

Например, если $U_{зи} = -1$ В, а $U_{си} = +2$ В, то $U_{зс} = -1$ В $-$ 2 В $=$ -3 В.

По мере приближения к стоку к p - n -переходу прикладывается все более отрицательное напряжение (обратное) и ширина l возрастает, а ширина $w = a - 2l$ уменьшается. Канал перекрывается таким образом по двум причинам. Под действием управляющего напряжения на затворе канал сужается по всей длине равномерно. Под действием напряжения на стоке канал сужается по мере приближения к стоку.

На рис. 5.2 изображено сечение канала для различных $U_{зи}$ и $U_{си}$.

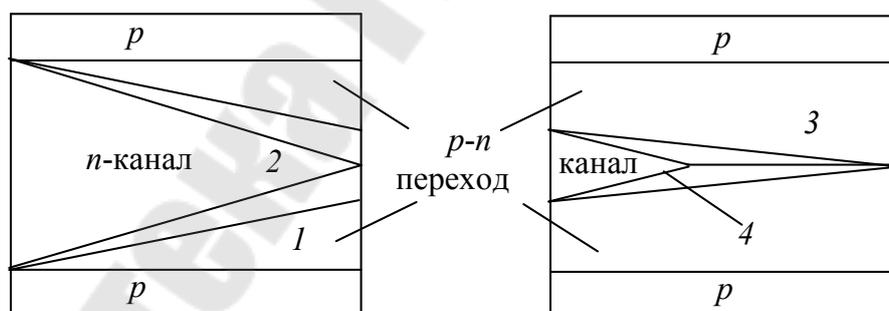


Рис. 5.2. Смыкание высокоомных слоев и перекрытие канала

Из рисунков видно, что чем больше напряжение на затворе (по абсолютной величине), тем меньше начальная ширина и проводимость канала, и тем меньше напряжение $U_{си}$, при котором канал перекрывается. Если $U_{си} \geq |U_{зиотс}|$, то канал перекрывается у стока и при $U_{зи} = 0$, когда ширина канала у истока максимальна.

График 1 на рис. 5.2 соответствует высокой проводимости канала, а графики 2, 3, 4 – низкой проводимости (канал перекрыт). Перекрытие канала приводит к резкому возрастанию дифференциального сопротивления канала и слабой зависимости тока от приложенного к каналу напряжения $U_{си}$.

В табл. 5.1 приводятся условные графические изображения полевых транзисторов с $p-n$ -переходом и каналами n - и p -типа с указанием полярности рабочих напряжений и положительных направлений токов.

Таблица 5.1

Графическое изображение	Тип канала и полярности напряжений
	Канал n -типа. Напряжение на стоке положительное относительно истока, на затворе – отрицательное: $U_{си} > 0, U_{зи} \leq 0$
	Канал p -типа. Напряжение на стоке отрицательное относительно истока, на затворе – положительное: $U_{си} < 0, U_{зи} \geq 0$

Зависимости между токами и напряжениями, приложенными к электродам полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом, описываются семействами вольт-амперных характеристик. Статические стоковые характеристики представляют собой зависимости тока от напряжения сток–исток при постоянном напряжении на затворе (рис. 5.3):

$$I_c = f(U_{си})|_{U_{зи}=\text{const}}$$

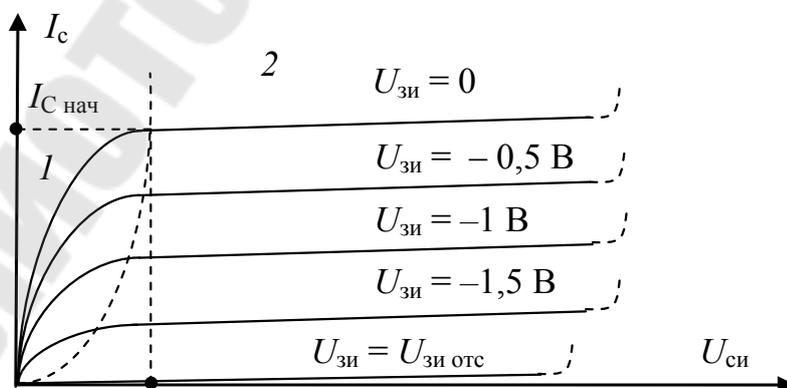


Рис. 5.3. Стоковые характеристики

При напряжениях на затворе, превышающих напряжение отсечки, канал перекрыт, и ток через транзистор практически отсутствует. При $U_{зи} = 0$ начальная ширина канала у истока максимальна, через транзистор протекает ток, зависящий от напряжения $U_{си}$. При малых напряжениях $U_{си}$ ток стока возрастает почти пропорционально напряжению $U_{си}$ (участок 1). Когда напряжение $U_{си}$ достигнет значения $|U_{зи\text{отс}}|$, канал у стока перекрывается, сопротивление канала увеличивается, происходит замедление роста тока I_c – участок 2. Важным параметром ВАХ является начальный ток стока $I_{с.нач}$ – ток стока при $U_{зи} = 0$, $U_{си} \geq |U_{зи\text{отс}}|$. Если $U_{зи\text{отс}} \leq U_{зи} \leq 0$ (для транзистора с каналом n -типа), то исходная ширина канала уменьшается по сравнению со случаем $U_{зи} = 0$, ток стока нарастает медленнее, а перекрытие канала и переход из области 1 линейного нарастания тока в область ограничения тока 2 происходит при меньших напряжениях $U_{си} = |U_{зи\text{отс}} - U_{зи}|$.

В пологой части ВАХ при увеличении $U_{си}$ ток стока несколько возрастает, так как сопротивление перекрытого канала возрастает медленнее, чем напряжение $U_{си}$ (примерно пропорционально $\sqrt{U_{си}}$). При дальнейшем увеличении $U_{си}$ возможен электрический пробой p - n -перехода у стока. Напряжение на p - n -переходе складывается из напряжений $|U_{зи}|$ и $U_{си}$, поэтому пробой наступает раньше при больших напряжениях $|U_{зи}|$.

На участке 1, когда $U_{си} < |U_{зи\text{отс}} - U_{зи}|$, стоковые характеристики описываются уравнением

$$I_c = I_{с.нач} \left(2 \frac{U_{си}}{U_{зи\text{отс}}} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи\text{отс}}} \right) - \left(\frac{U_{зи}}{U_{зи\text{отс}}} \right)^2 \right) \quad (4)$$

и на начальном участке при малых $U_{си} \ll U_{зи\text{отс}}$:

$$I_c = I_{с.нач} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи\text{отс}}} \right) 2 \frac{U_{си}}{U_{зи\text{отс}}}. \quad (5)$$

Начальное сопротивление канала, характеризующее наклон крутых участков ВАХ, из последней формулы определяется выражением

$$R_{си0} = \frac{U_{си}}{I_c} = \frac{|U_{зиотс}|}{2I_{снач}} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зиотс}}\right)^{-1} = \frac{U_{зиотс}^2}{2I_{снач} |U_{зиотс} - U_{зи}|}. \quad (6)$$

На пологом участке 2 ВАХ ток стока слабо зависит от напряжения $U_{си}$ и может быть найден по формуле

$$I_c = I_{снач} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зиотс}}\right)^2. \quad (7)$$

Характеристика прямой передачи – стокзатворная (рис. 5.4.) – описывает зависимость тока стока от напряжения на затворе при постоянном напряжении на стоке: $I_c = f(U_{зи})|_{U_{зи}=\text{const}}$.

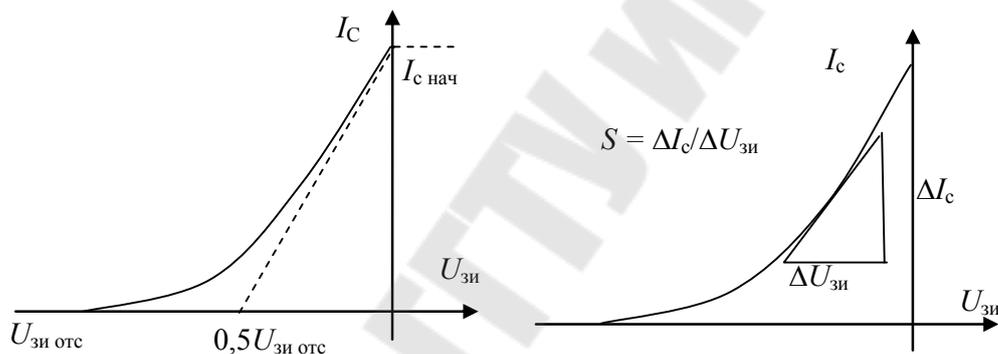


Рис. 5.4. Стокзатворная ВАХ полевого транзистора с каналом n -типа

При отрицательных напряжениях $U_{зи}$, превышающих по модулю $U_{зиотс}$, ток отсутствует. При положительных $U_{зи}$ ток стока возрастает, но такой режим на практике не применяется из-за отпираания p - n -переходов. Аналитическое выражение стокзатворной ВАХ соответствует формуле (7).

Если продифференцировать выражение (7), то получим:

$$\frac{dI_c}{dU_{зи}} = -\frac{2I_{снач}}{|U_{зиотс}|} = -\frac{I_{снач}}{0,5|U_{зиотс}|}. \quad (8)$$

Касательная, проведенная к стокзатворной характеристике в точке $[U_{зи} = 0; I_c = I_{снач}]$, отсекает на оси абсцисс отрезок длиной $U_{зиотс} / 2$.

Важнейшим усилительным параметром полевого транзистора является крутизна стокзатворной характеристики:

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зи}} \text{ при } U_{си} = \text{const, мА/В.} \quad (9)$$

Из рис. 5.4 видно, что максимальная крутизна соответствует $U_{зи} = 0$ и уменьшается с ростом (по модулю) $U_{зи}$.

В соответствии с формулой (7):

$$S_{\text{макс}} = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{зи}=0} = \frac{2I_{\text{снач}}}{U_{\text{зиотс}}}. \quad (10)$$

Если определить минимальное сопротивление канала $R_{\text{си0}}$ по формуле (6), приняв $U_{зи} = 0$:

$$R_{\text{си0}} = \frac{U_{\text{зиотс}}}{2I_{\text{снач}}}, \quad (11)$$

то из формул (10)–(11) получим соотношение

$$S_{\text{макс}} = \frac{1}{R_{\text{си0}}}. \quad (12)$$

Для увеличения крутизны необходимо уменьшать сопротивление канала, что достигается увеличением отношения ширины канала к его длине. В то же время уменьшение сопротивления канала путем увеличения примеси нежелательно, потому что необходимо обеспечить распространение p – n -переходов в область канала при увеличении обратного напряжения на p – n -переходе.

Значение крутизны для пологой части ВАХ можно найти по формуле

$$S = S_{\text{макс}} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{зи}}{U_{\text{зиотс}}}} \right). \quad (13)$$

Графически по статическим ВАХ крутизну определяют по углу наклона касательной, проведенной к стокзатворной характеристике в заданной рабочей точке:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{си} = \text{const.} \quad (14)$$

К дифференциальным параметрам полевого транзистора относится также внутренне сопротивление R_i , определяемое как отношение изменения напряжения на стоке к изменению тока стока при постоянном напряжении на затворе. Внутренне сопротивление определяется с помощью стоковых характеристик по наклону графика тока в пологой области 2 ВАХ (рис. 5.3):

$$R_i = \frac{dU_{си}}{dI_c} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{зи} = \text{const.} \quad (15)$$

Входная характеристика $I_3 = f(U_{зи})|_{U_{си}=\text{const}}$ представляет собой ВАХ $p-n$ -перехода с резким возрастанием тока при $U_{зи} > 0$.

Схема замещения полевого транзистора в режиме малого сигнала приведена на рис. 5.5.

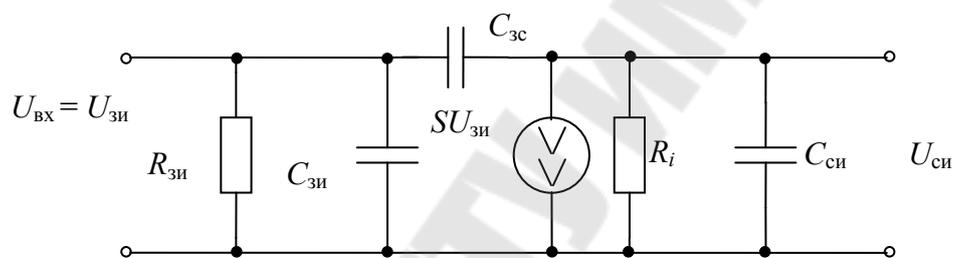


Рис. 5.5. Схема замещения полевого транзистора

В полевом транзисторе отсутствуют процессы инжекции и накопления неосновных носителей. Поэтому быстродействие и частотные свойства определяются процессами перезаряда барьерных емкостей управляющих $p-n$ -переходов. Входное сопротивление $R_{зи}$ на постоянном токе представляет собой сопротивление обратносмещенного $p-n$ -перехода и по величине составляет 10^7-10^9 Ом. Емкости для маломощных транзисторов, имеющих малые площади $p-n$ -переходов, составляют единицы пикофарад. Источник тока $SU_{зи}$ отражает усиленные свойства транзистора. Внутренне сопротивление источника R_i на высоких частотах шунтируется емкостью $C_{си}$. При работе транзистора от высокоомного источника сигнала частотный диапазон ограничен временем перезаряда входной емкости $C_{зи}$ через сопротивление источника сигнала. Проходная емкость $C_{зс}$ образует частотозависимую обратную связь, уменьшающую усиление на высоких частотах. Поэтому емкость $C_{зс}$ стараются технологически уменьшать. Полевые транзисторы используются в трех основных схемах включения.

Усилительный каскад в схеме с общим истоком обеспечивает усиление по напряжению и мощности, коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = S(R_i // R_{\text{H}}) \approx SR_{\text{H}}.$$

Схема с общим стоком – истоковый повторитель обеспечивает коэффициент передачи по напряжению примерно равный единице, большое входное сопротивление и низкое выходное:

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx \frac{1}{S} = R_{\text{СИ0}}.$$

Схема с общим затвором имеет низкое входное сопротивление – примерно $R_{\text{СИ0}}$. Такое включение транзистора используется для построения источников тока и высококачественных повторителей тока, так как из-за очень малого значения токов утечки затвора с высокой степенью точности выполняется условие $I_{\text{C}} = I_{\text{И}}$.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследуются статические характеристики и параметры полевого транзистора КП307А, имеющие основные параметры:

Начальный ток стока $I_{\text{Cнач}}$ при $U_{\text{СИ}} = 10 \text{ В}$	(3÷9) мА
Напряжение отсечки $U_{\text{ЗИотс}}$ при $U_{\text{СИ}} = 10 \text{ В}$,	
$I_{\text{C}} = 10 \text{ мкА}$	–(0,5÷3) В
Крутизна S при $U_{\text{СИ}} = 10 \text{ В}$, $U_{\text{ЗИ}} = 0$	(4÷9) мА/В
Ток утечки затвора при $T = +25 \text{ °C}$, $U_{\text{ЗИ}} = -10 \text{ В}$	< 1 нА
Максимально допустимые параметры:	
Максимальный ток стока $I_{\text{Cмакс}}$	25 мА
Максимальное напряжение $U_{\text{СИмакс}}$	27 В
Максимальные напряжения $U_{\text{ЗИмакс}}$, $U_{\text{ЗСмакс}}$	–27 В
Прямой ток затвора $I_{\text{Зпр.макс}}$	5 мА
Постоянная рассеиваемая мощность $P_{\text{макс}}$	250 мВт
Температура структуры	+140 °C
Температура окружающей среды	–40÷+85 °C

Схема эксперимента приведена на рис. 5.6.

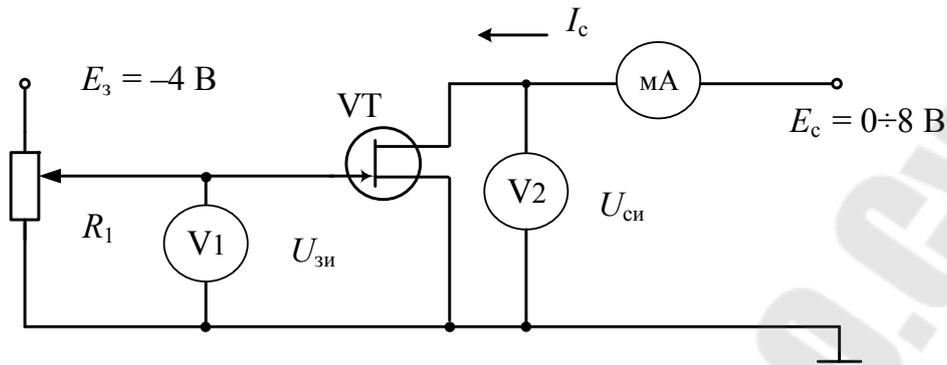


Рис. 5.6. Схема эксперимента

Начальный ток стока $I_{снач}$ определяют при $U_{зи} = 0$ и заданном напряжении на стоке.

Напряжение отсечки $U_{зиотс}$ определяют при заданном токе стока, который для исследуемого транзистора составляет 10 мкА, и заданном напряжении $U_{си}$.

Семейство стокowych ВАХ снимают для четырех значений $U_{зи}$:

$$U_{зи1} = 0, \quad U_{зи2} = 0,25U_{зиотс}, \quad U_{зи3} = 0,5U_{зиотс}, \quad U_{зи4} = 0,75U_{зиотс}.$$

Стокзатворную характеристику снимать для 10 значений $U_{зи}$ в том же диапазоне, что и стокую, поддерживая постоянным заданное значение $U_{си}$.

4. ЗАДАНИЕ

1. Собрать схему эксперимента.
2. Определить $I_{снач}$ ($U_{зи} = 0$) и $U_{зиотс}$ ($I_{снач} = 10$ мкА) при $U_{си} = 5$ В.
3. Снять семейство стокowych ВАХ (табл. 5.2).

Таблица 5.2

$U_{си}, \text{В}$		0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	4	6	8
$U_{зи1} = 0$	$I_c, \text{мА}$									
$U_{зи2} =$										
$U_{зи3} =$										
$U_{зи4} =$										

4. Снять стокзатворную характеристику при $U_{\text{си}1} = 4 \text{ В}$ и $U_{\text{си}2} = 8 \text{ В}$ (табл. 5.3).

Таблица 5.3

$U_{\text{зи}}, \text{В}$		0	$0,1U_{\text{зи отс}}$	$0,2U_{\text{зи отс}}$...	$U_{\text{зи отс}}$
$I_{\text{с}}, \text{мА}$	$U_{\text{си}1}$					
	$U_{\text{си}2}$					

5. Построить стоковые и стокзатворные характеристики.

6. Определить внутреннее сопротивление R_i для $U_{\text{си}} = 5 \text{ В}$, $I_{\text{с}} = 0,5I_{\text{снач}}$.

Указание. R_i определяется графоаналитическим методом: $R_i = \Delta U_{\text{си}} / \Delta I_{\text{с}}$ в соответствии с определением (15).

7. С использованием измеренных значений $I_{\text{снач}}$ и $U_{\text{зи отс}}$ построить совместно с экспериментальной теоретическую стокзатворную характеристику, предварительно заполнив таблицу, аналогичную табл. 5.3. Сравнить полученные данные с экспериментальными.

Указание. Для построения характеристики использовать теоретическую аппроксимацию (7).

8. По экспериментальной стокзатворной характеристике определить максимальную крутизну $S_{\text{макс}}$, минимальное сопротивление $R_{\text{си}0}$ теоретическое значение $U_{\text{зи отс}}$.

Указание. Воспользоваться формулами (9–12) и рис. 5.4 для определения $0,5U_{\text{зи отс}}$. Параметр $R_{\text{си}0}$ определить также с помощью стоковых характеристик – по наклону касательной в точке $I_{\text{с}} = 0$, $U_{\text{си}} = 0$, при $U_{\text{зи}} = 0$.

9. Построить теоретическую зависимость $S_T = f(U_{\text{зи}})|_{U_{\text{си}}=\text{const}}$ для $U_{\text{си}} = 5 \text{ В}$, а также зависимость $S_{\text{э}} = f(U_{\text{зи}})$, определяя экспериментальное значение $S_{\text{э}}$ по экспериментальной стокзатворной характеристике. Предварительно заполнить табл. 5.4.

Таблица 5.4

$U_{\text{зи}}, \text{В}$	0	$0,2U_{\text{зи отс}}$	$0,4U_{\text{зи отс}}$	$0,6U_{\text{зи отс}}$	$0,8U_{\text{зи отс}}$	$U_{\text{зи отс}}$
$S_T, \text{мА/В}$						
$S_{\text{э}}, \text{мА/В}$						

Указание. Значения S_T рассчитывать по формуле (13). Экспериментальное значение S_3 определять графоаналитическим методом (рис. 5.4).

10. Привести схему замещения транзистора с указанием величин определенных параметров для режима $U_{си} = 5 \text{ В}$, $I_c = 0,5I_{снач}$.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать краткие теоретические сведения, конструкцию и принцип действия полевого транзистора с $p-n$ -переходом, данные эксперимента, результаты расчета и графики, выводы по работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Описать конструкцию полевого транзистора.
2. Объяснить принцип действия полевого транзистора.
3. Привести условные графические изображения полевых транзисторов с каналами n - и p -типа, обосновать полярности рабочих напряжений на электродах.
4. Дать определение напряжения отсечки, объяснить, как влияет напряжение на стоке на процесс перекрытия канала.
5. Изобразить вид канала для различных сочетаний напряжений на затворе и стоке.
6. Объяснить наличие на стоковых ВАХ пологого и крутого участков.
7. Привести аналитическое выражение для стокзатворной характеристики.
8. Дать определение крутизны и внутреннего сопротивления, пояснить их определение по ВАХ.
9. Привести схему замещения полевого транзистора.

ИССЛЕДОВАНИЕ МДП-ТРАНЗИСТОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение конструкции и принципа действия МДП-транзистора с индуцированным и встроенным каналами, экспериментальное исследование статических характеристик и определение параметров МДП-транзистора с индуцированным каналом p -типа.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В полевых МДП-транзисторах металлический затвор изолирован от полупроводникового канала диэлектриком, т. е. транзистор представляет собой структуру металл–диэлектрик–полупроводник–МДП. Наиболее распространен диэлектрик оксид кремния, поэтому такие транзисторы часто называют МОП-транзисторы.

Различают МДП-транзисторы с встроенным каналом и индуцированным каналом. В МДП-транзисторах с встроенным каналом канал создается технологически. Основой МДП-транзистора является подложка слаболегированного кремния. В теле подложки создаются сильнолегированные области другого типа проводимости, соединенные каналом того же типа проводимости. В зависимости от типа проводимости различают транзисторы с каналом n -типа и p -типа. Наиболее распространены по технологическим причинам транзисторы с встроенным каналом n -типа (рис. 6.1). В теле подложки – кристалла кремния p -типа проводимости – созданы две сильнолегированные области n -типа проводимости, соединенные каналом n -типа. Одна из областей n -типа является истоком, а другая стоком. Электрод затвора изолирован от канала тонким слоем диэлектрика.

Если приложить между стоком и истоком напряжение, положительное на стоке относительно истока, то через канал будет протекать ток, обусловленный начальной проводимостью канала.

Если к затвору приложить положительное напряжение относительно истока, то электроны будут притягиваться из полупроводника к затвору, проводимость канала увеличивается, ток через транзистор возрастает. Такой режим работы при $U_{зи} > 0$ для транзистора со встроенным каналом n -типа называется обогащением.

При подаче на затвор отрицательного напряжения относительно истока дырки притягиваются из подложки, а электроны отталкиваются из канала, происходит обеднение канала основными носителями – электронами, проводимость канала уменьшается. При некотором отрицательном напряжении $U_{зи} = U_{отс}$, называемом напряжением отсечки, происходит инверсия типа электропроводности канала: n^+ -области будут разделены слоем p -типа проводимости. Ток стока определяется обратным током p - n -перехода, образованного n^+ -слоем и p -слоем подложки. При протекании тока через канал от стока к истоку (движение электронов в обратном направлении) потенциал канала становится более положительным относительно затвора по мере приближения к стоку, что равносильно подаче на соответствующий участок затвора отрицательного напряжения. Поэтому канал сужается к стоку и при $U_{си} \geq |U_{отс}|$ канал перекрывается.

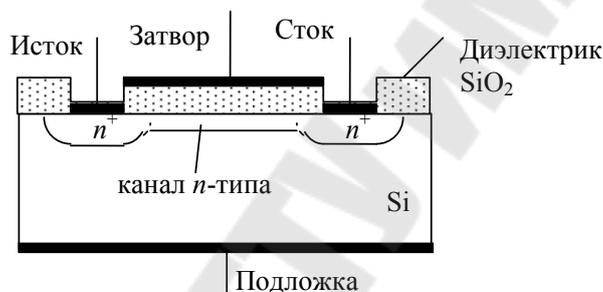


Рис. 6.1. МДП-транзистор с встроенным каналом n -типа

На рис. 6.2 приведено семейство стоковых характеристик $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа.

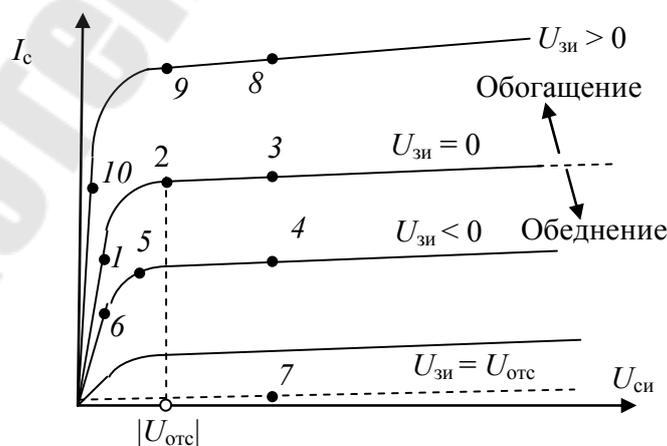


Рис. 6.2. Стоковые характеристики МДП-транзистора с встроенным каналом n -типа

Стоковые характеристики содержат омический участок линейного нарастания тока стока и участок насыщения (ограничения) тока стока. Переход от одного участка к другому обусловлен смыканием канала у стока.

На рис. 6.3 изображен вид канала для характерных точек стоковой характеристики.

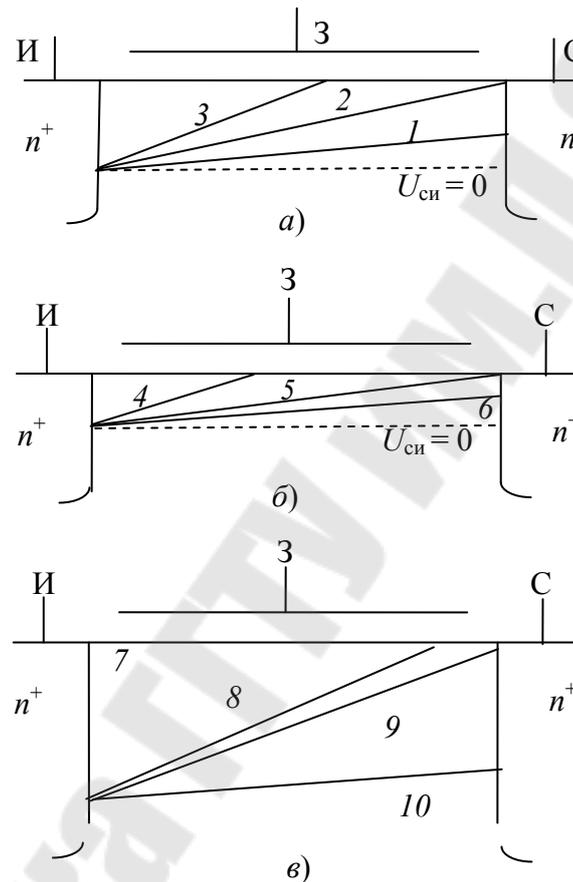


Рис. 6.3. Вид канала МДП-транзистора с встроенным каналом:

- а* – $U_{зи} = 0$: 1. $U_{си} < |U_{отс}|$ – линейный участок; 2. $U_{си} \approx |U_{отс}|$ – граничная точка; 3. $U_{си} > |U_{отс}|$ – участок насыщения;
- б* – $U_{зи} < 0$: 4. $U_{си} > U_{зи} - U_{отс}$ – участок насыщения; 5. $U_{си} \approx U_{зи} - U_{отс}$ – граничная точка; 6. $U_{си} < U_{зи} - U_{отс}$ – линейный участок; 7. $U_{зи} - U_{отс} < 0, I_c = 0$ – отсечка;
- в* – $U_{зи} > 0$ Обогащение канала: 8. $U_{си} > U_{зи} - U_{отс}$ – участок насыщения; 9. $U_{си} \approx U_{зи} - U_{отс}$ – граничная точка; 10. $U_{си} < U_{зи} - U_{отс}$ – линейный участок

В общем случае потенциал участка канала, прилегающего к затвору, относительно затвора равен $U_{си} - U_{зи}$. На линейном (омическом участке) при $U_{зи} = 0, U_{си} < |U_{отс}|$ ток стока возрастает линейно при

увеличении $U_{\text{си}}$ (т. 1, рис. 6.2). Когда из-за падения напряжения на объемном сопротивлении канала напряжение между стоком и затвором станет равным $U_{\text{отс}}$, обедненный слой смыкается с поверхностью, канал перекрывается – т. 2. Дальнейшее увеличение $U_{\text{си}}$ не приводит к существенному увеличению тока стока, а перекрытие канала происходит на участках канала, расположенных ближе к истоку – т. 3. Чем меньше напряжение на затворе относительно истока, тем ниже начальная проводимость канала и тем раньше (при меньшем напряжении $U_{\text{си}}$) канал смыкается – т. 4, 5, 6, рис. 6.2, рис. 6.3, б. При $U_{\text{зи}} < U_{\text{отс}}$ канал перекрыт, ток $I_{\text{с}} = 0$ – т. 7.

В режиме обогащения при $U_{\text{зи}} > 0$ увеличивается ток насыщения транзистора – т. 8, перекрытие канала происходит при большем напряжении $U_{\text{си}}$ – т. 9, а линейный участок более крутой – т. 10.

На рис. 6.4 изображена стокзатворная характеристика $I_{\text{с}} = f(U_{\text{зи}})|_{U_{\text{си}}=\text{const}}$.

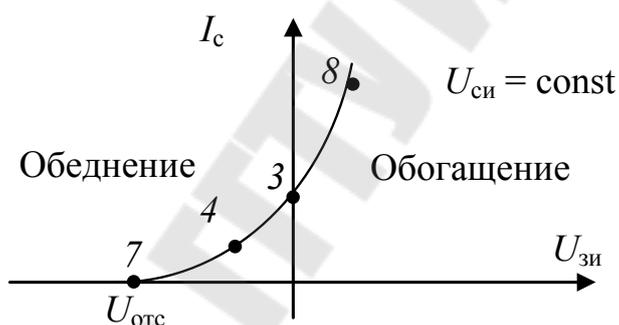


Рис. 6.4. Стокзатворная характеристика МДП-транзистора с встроенным каналом n -типа

Номера характерных точек соответствуют рис. 6.2–6.4. При $U_{\text{зи}} > 0$ канал обогащается носителями n -типа, при $U_{\text{зи}} < 0$ обедняется, при $U_{\text{зи}} = U_{\text{отс}}$ происходит инверсия типа проводимости приповерхностного слоя, канал n -типа исчезает, ток $I_{\text{с}}$ практически равен нулю. Протекает лишь малый ток обратосмещенного перехода, образованного n^+ -областью стока и p -областью подложки.

Для предотвращения протекания прямых токов p – n -переходов исток-подложка и сток-подложка к электроду подложки p -типа подключают отрицательное напряжение, а к подложке n -типа – положительное. Иногда при помещении кристалла в корпус электрод подложки соединяют с истоком.

МДП-транзисторы с индуцированным (сформированным с помощью электрического поля) каналом как правило изготавливаются на подложке кремния n -типа проводимости, в которой создаются две сильнолегированные области p^+ -типа проводимости. Области p^+ -типа имеют омические контакты с электродами – истоком и стоком. Электрод затвора изолирован от подложки тонким слоем диэлектрика (рис. 6.5).

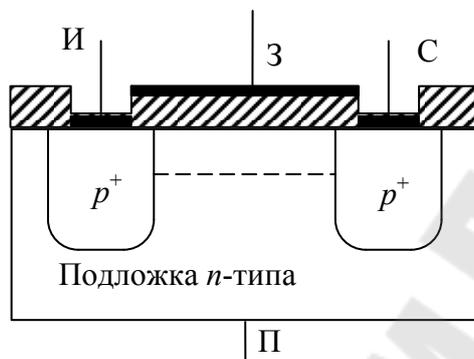


Рис. 6.5. МДП-транзистор с индуцированным каналом p -типа

Транзистор со стороны электродов С и И представляет собой два встречно включенных p - n -перехода, и ток через него отсутствует. Если к затвору приложить отрицательное напряжение относительно подложки, соединенной с истоком, то в области подложки под затвором вначале образуется обедненный слой вследствие выталкивания электронов. При дальнейшем увеличении отрицательного напряжения на затворе свободные дырки из подложки притягиваются в приповерхностный слой. При напряжении $U_{\text{пор}}$ концентрация дырок в приповерхностном слое становится больше концентрации электронов, происходит инверсия типа проводимости приповерхностного слоя. Образуется канал p -типа, соединяющий области p^+ -типа – сток и исток. Если между стоком и истоком приложить отрицательное напряжение $U_{\text{си}}$, то при наличии канала будет протекать ток, обусловленный движением дырок от истока к стоку. Для образования канала на затворе относительно подложки (истока) должно быть отрицательное напряжение $|U_{\text{зи}}| < |U_{\text{пор}}|$. При протекании тока стока потенциал канала, прилегающего к затвору, становится более отрицательным. При некотором напряжении $U_{\text{си}} < U_{\text{пор}}$ потенциал канала становится равным $U_{\text{пор}}$ относительно затвора, канал у стока перекрывается. Ток стока при дальнейшем увеличении не возрастает – участок насыщения. При большем по абсолютной величине напряжении $U_{\text{зи}}$ ток на-

сыщения увеличивается, а переход из линейного режима в режим насыщения тока происходит при больших напряжениях $U_{си}$. На рис. 6.6 приведено семейство стоковых характеристик транзистора с индуцированным каналом p -типа.

Через транзистор протекает ток только в режиме обогащения, когда напряжение на затворе более отрицательное, чем $U_{пор}$. Перегиб характеристик происходит, когда напряжение $U_{си}$ превышает по абсолютной величине $|U_{зи}| - |U_{пор}|$.

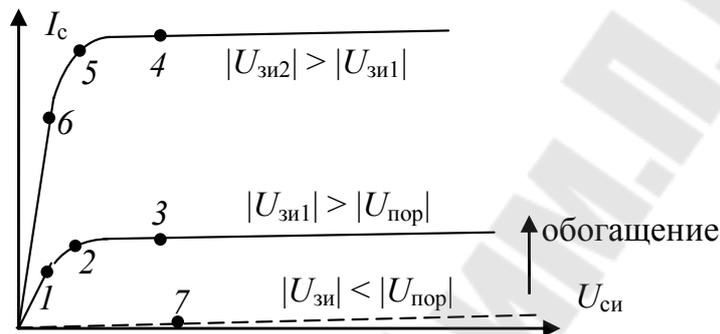


Рис. 6.6. Стоковые характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом p -типа

Вид канала для характерных точек ВАХ изображен на рис. 6.7.

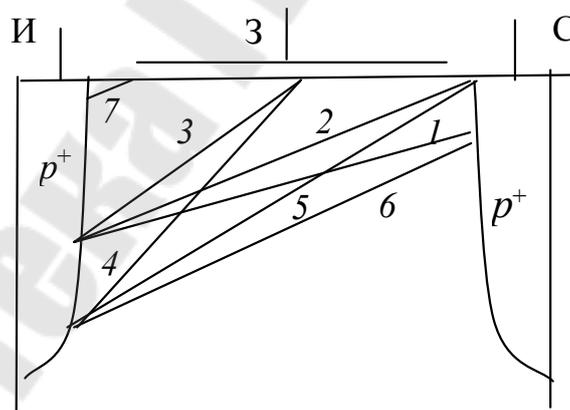


Рис. 6.7. Вид канала МДП-транзистора:

- 1 — $|U_{зи1}| > |U_{пор}|$, $U_{си} < |U_{зи1}| - |U_{пор}|$ — линейный участок;
- 2 — $|U_{зи1}| > |U_{пор}|$, $|U_{си}| \approx |U_{зи1}| - |U_{пор}|$ — граничная точка;
- 3 — $|U_{зи1}| > |U_{пор}|$, $|U_{си}| > |U_{зи1}| - |U_{пор}|$ — участок насыщения;
- 4 — $|U_{зи2}| > |U_{зи1}|$, $|U_{си}| < |U_{зи2}| - |U_{пор}|$ — линейный участок;
- 5 — $|U_{зи2}| > |U_{зи1}|$, $|U_{си}| \approx |U_{зи2}| - |U_{пор}|$ — граничная точка;
- 6 — $|U_{зи2}| > |U_{зи1}|$, $|U_{си}| > |U_{зи2}| - |U_{пор}|$ — участок насыщения;
- 7 — $|U_{зи}| \leq |U_{пор}|$, $I_c \approx 0$ — канал отсутствует

Если, например, пороговые напряжения транзистора с индуцированным каналом p -типа $U_{\text{пор}} = -5$ В, то при $U_{\text{зи}} = -7$ В переход от линейного участка к участку насыщения тока стока – перекрытие канала у стока – происходит при $U_{\text{си}} = U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}} = -7$ В – $(-5$ В) = -2 В, так как у стока напряжение на затворе относительно канала равно пороговому: $U_{\text{зс}} = U_{\text{зи}} - U_{\text{си}} = -7$ В – $(-2$ В) = -5 В = $U_{\text{пор}}$. Если же $U_{\text{зи}} = -10$ В, то напряжение перекрытия канала $U_{\text{си}} = -10$ В – $(-5$ В) = -5 В.

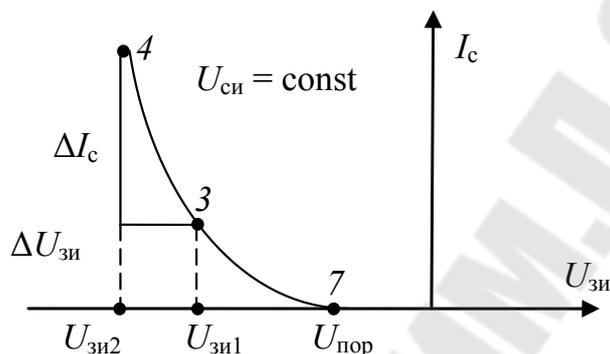


Рис. 6.8. Стокзатворная характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом p -типа

Стокзатворная характеристика снимается при фиксированном напряжении $U_{\text{си}}$. При увеличении напряжения на стоке (по модулю) стокзатворная характеристика идет более круто, при уменьшении более полого, во всех случаях проходя через точку 7 – [$U_{\text{зи}} = U_{\text{пор}}$; $I_c = 0$].

Зависимость тока стока от напряжений на затворе и стоке описывается выражением

$$I_c = S_{\text{уд}} [(U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}) U_{\text{си}} - 0,5 U_{\text{си}}^2]. \quad (1)$$

Это выражение справедливо для МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналом при достаточно малых напряжениях на стоке, когда эффект перекрытия канала проявляется слабо. Для транзисторов с встроенным каналом вместо $U_{\text{пор}}$ используется $U_{\text{отс}}$. Коэффициент $S_{\text{уд}}$ называется удельная крутизна и имеет размерность мА/В^2 . Удельная крутизна прямо пропорциональна подвижности носителей в канале, ширине канала (поэтому мощные МДП-транзисторы с относительно большой шириной канала обладают большей крутизной) и обратно пропорциональна длине канала и толщине диэлектрика, изолирующего затвор. Последнее обстоятельство наряду с очень большим

входным сопротивлением обуславливает необходимость применения специальных мер при хранении и пайке МДП-транзисторов, так как пробой тонкого слоя диэлектрика возможен при простом прикосновении к затвору.

Полагая в уравнении (1) $U_{зи} = \text{const}$, получим аналитическое описание стоковых характеристик, а при $U_{си} = \text{const}$ – стокзатворных.

В области насыщения, когда $|U_{си}| \geq |U_{зи} - U_{пор}|$ и канал перекрыт, ток стока слабо зависит от $U_{си}$.

Подставляя в (1) $U_{си} = U_{зи} - U_{пор}$, получим выражение для стоковых характеристик в области насыщения и для стокзатворной характеристики:

$$I_c = 0,5S_{уд}(U_{зи} - U_{пор})^2. \quad (2)$$

В области насыщения стокзатворная характеристика имеет квадратичный характер (рис. 6.8).

Крутизна МДП-транзистора определяется дифференцированием уравнения (2):

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зи}} = S_{уд}(U_{зи} - U_{пор}). \quad (3)$$

Из формулы (3) понятен физический смысл $S_{уд}$: удельная крутизна – это крутизна транзистора при $|U_{зи} - U_{пор}| = 1$ В.

Дифференциальное выходное сопротивление стока получим, продифференцировав уравнение (1):

$$R_c = \left(\frac{dI_c}{dU_{си}} \right) = \frac{1}{S_{уд}(U_{зи} - U_{пор} - U_{си})}. \quad (4)$$

При увеличении $U_{си}$ и приближении его к $U_{зи} - U_{пор}$ происходит перекрытие канала и R_c резко возрастает, теоретически стремясь к бесконечности. Практически стоковые характеристики в области насыщения имеют конечный наклон, а сопротивление R_c характеризуется внутренним сопротивлением R_i , определяемым аналогично Z_k биполярных транзисторов и R_i полевых транзисторов с p - n -переходом (рис. 6.9).

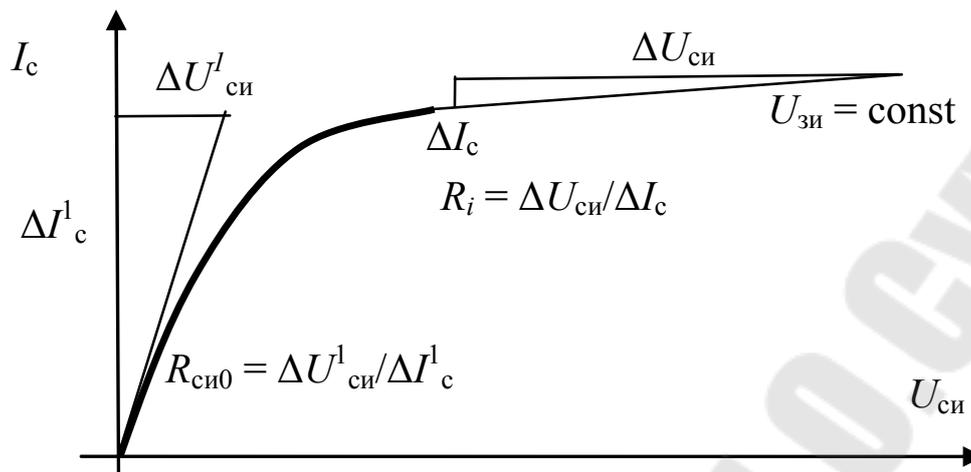


Рис. 6.9. Определение $R_{си0}$ и R_i по стоковым характеристикам МДП-транзистора

Минимальное сопротивление стока достигается при $U_{си} = 0$, называется сопротивлением сток–исток или сопротивлением канала полевого транзистора в открытом состоянии:

$$R_{си0} = \frac{1}{S_{уд}(U_{зи} - U_{пор})} = \frac{1}{S}. \quad (5)$$

По стоковым характеристикам $R_{си0}$ можно определить через крутизну графика тока в начале координат (рис. 6.9).

Из формулы (5) видно, что для уменьшения сопротивления $R_{си0}$ необходимо увеличивать крутизну.

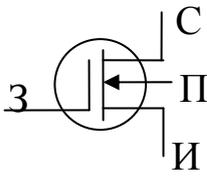
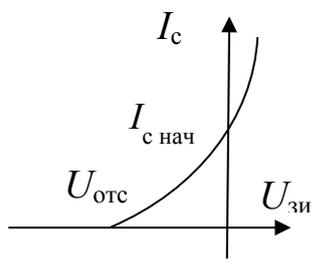
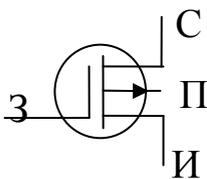
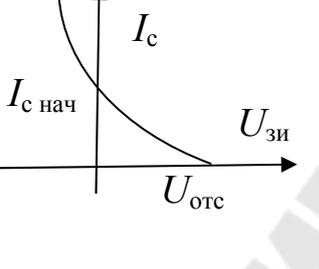
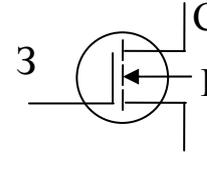
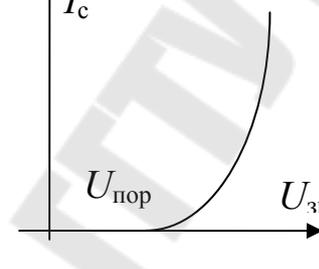
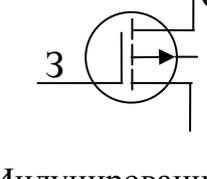
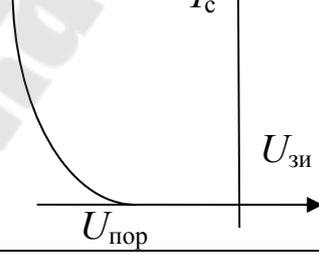
Значения сопротивлений $R_{си0} = 10 \div 200$ Ом, $R_i = 10 \div 100$ кОм.

В табл. 6.1 приведены условные графические изображения МДП-транзисторов, вид стокзатворной характеристики и полярности рабочих напряжений на электродах.

Схема замещения МДП-транзистора в режиме малого сигнала аналогична эквивалентной схеме полевого транзистора с $p-n$ -переходом. Особенностью МДП-транзисторов является существенно большее по сравнению с другими полупроводниковыми приборами – по $10^{12} - 10^{15}$ Ом – входное сопротивление.

МДП-транзисторы с встроенным каналом применяются, как правило, в усилительных каскадах, а с индуцированным каналом – для построения аналоговых и цифровых ключей.

Таблица 6.1

Тип канала МДП-транзистора	Стокзатворная характеристика	Полярности напряжений
 Встроенный канал <i>n</i> -типа		Напряжение на стоке положительное относи- тельно истока, на под- ложке – отрицательное
 Встроенный канал <i>p</i> -типа		Напряжение на стоке отрицательное, на под- ложке – положительное
 Индуцированный канал <i>n</i> -типа		Напряжение на стоке положительное, на за- творе положительное относительно истока, на подложке – отрица- тельное
 Индуцированный канал <i>p</i> -типа		Напряжение на стоке и затворе отрицатель- ное относительно исто- ка, на подложке – по- ложительное

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследуется МДП-транзистор с индуцированным кана-
лом *p*-типа КП301Б, имеющий основные параметры:

Пороговое напряжение $U_{пор}$, при $U_{си} = -15$ В,

$I_c = 0,3$ мА

$-2,7 \div -5,4$ В

Крутизна S при $U_{си} = -15$ В, $I_c = 5$ мА

$1 \div 2,6$ мА/В

Активная составляющая выходной проходимости g_{22} при $U_{си} = -15$ В, $I_c = 5$ мА не более	150 мкС
Прямой ток затвора $I_{з.пр макс}$	5 мА
Постоянная рассеиваемая мощность $P_{макс}$	200 мВт
Температура структуры	+140 °С
Температура окружающей среды	-40÷85 °С
Предельно допустимые параметры:	
Максимальный постоянный ток стока $I_{с макс}$	15 мА
Напряжение $U_{зи макс}$	30 В
Напряжение $U_{си макс}$	20 В
Постоянная рассеиваемая мощность $P_{макс}$	100 мВт
Температура окружающей среды	-45÷+70 °С
Схема эксперимента приведена на рис. 6.10.	

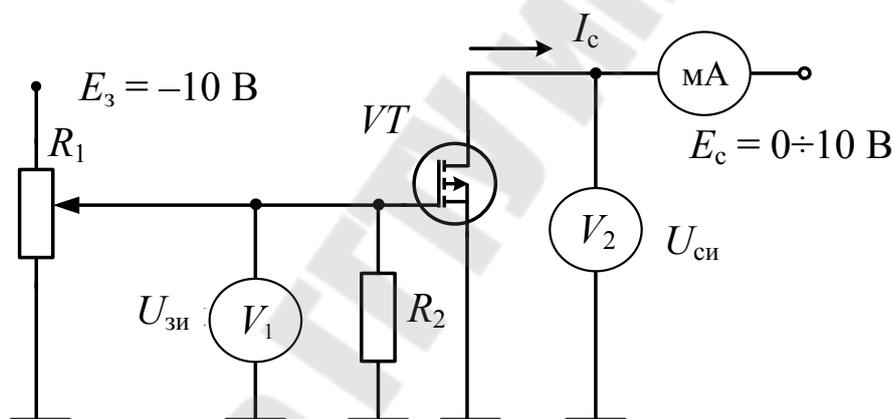


Рис. 6.10. Схема эксперимента

Подключение напряжения $U_{си}$ производить только предварительно установив $U_{зи} = 0$, затем повышать постепенно $|U_{зи}|$ и проводить измерения, не допуская при этом повышения тока стока свыше 10,5 мА.

Так как схема эксперимента собирается в процессе работы, для защиты транзистора от статического электричества электрод затвора соединен с истоком высокоомным резистором.

4. ЗАДАНИЕ

1. Определить пороговое напряжение $U_{зи} = U_{пор}$ при $U_{си} = -10$ В, $I_c = 0,1$ мА и напряжение $U_{зи}^1$, соответствующее $I_c = 10$ мА.

Определить шаг $\Delta U_{зи} = (U_{пор} - U_{зи}^1)0,2$.

2. Снять семейство стоковых характеристик для пяти значений $U_{зи}$ (табл. 6.2):

$$U_{зи1} = U_{пор} - 5 \cdot \Delta U_{зи} = U_{зи}^1$$

$$U_{зи2} = U_{пор} - 4 \cdot \Delta U_{зи}$$

$$U_{зи3} = U_{пор} - 3 \cdot \Delta U_{зи}$$

$$U_{зи4} = U_{пор} - 2 \cdot \Delta U_{зи}$$

$$U_{зи5} = U_{пор} - \Delta U_{зи}$$

Таблица 6.2

$U_{си}, \text{В}$		-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-1	-2	-3	-4	-6	-8	-10
$I_c, \text{мА}$	$U_{зи1}$											
	$U_{зи2}$											
	$U_{зи3}$											
	$U_{зи4}$											
	$U_{зи5}$											

3. Снять стокзатворную характеристику для трех значений $U_{си}$ (табл. 6.3).

Таблица 6.3

$U_{зи}, \text{В}$		$U_{зи1} =$	$U_{зи2} =$	$U_{зи3} =$	$U_{зи4} =$	$U_{зи5} =$
$I_c, \text{мА}$	$U_{си} = -10 \text{ В}$					
	$U_{си} = -8 \text{ В}$					
	$U_{си} = -2 \text{ В}$					

4. Построить семейство стоковых и стокзатворных характеристик.

5. Определить удельную крутизну транзистора $S_{уд}$.

Указание. Для определения удельной крутизны воспользоваться стокзатворной характеристикой при $U_{си} = -10$ В, определить крутизну S (рис. 6.8) и по формуле (3) рассчитать $S_{уд}$.

6. Построить теоретическую стокзатворную характеристику совместно с экспериментальной.

Указание. Воспользоваться результатом п. 5 и формулой (2).

7. Определить внутреннее сопротивление R_i для $U_{си} = -6$ В, $U_{зи} = U_{зи3}$.

8. С использованием стоковых характеристик по п. 4. построить зависимости S и $R_{си0}$ от напряжения на затворе (табл. 6.4).

Таблица 6.4

N	1	2	3	4	5
$U_{зи}$, В					
ΔI_c , мА					
ΔU_c , В					
$R_{си0}$, Ом					
S , мА/В					

Указание. Значения $U_{зи}$ задавать в соответствии с п. 2. Методика определения $R_{си0}$ указана на рис. 6.9. Для определения крутизны воспользоваться формулой (5).

9. На основании формулы (3) рассчитать теоретические значения крутизны S_T и построить график $S(U_{зи})$ совместно с расчетным значением S по п. 8.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать краткие теоретические сведения по теме работы, схему эксперимента, результаты экспериментов и расчетов в виде таблиц и графиков.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определить конструкцию и принцип действия полевых транзисторов с изолированным затвором и встроенным каналом p - и n -типов.

2. Описать конструкцию и принцип действия полевых транзисторов с изолированным затвором и индуцированным каналом p - и n -типов.

3. Объяснить статические характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором.

4. Объяснить стокзатворную характеристику МДП-транзисторов:

- а) с индуцированным каналом p -типа;
- б) с индуцированным каналом n -типа;
- в) с встроенным каналом p -типа;
- г) с встроенным каналом n -типа.

5. По заданным значениям порогового напряжения (или напряжения отсечки) и напряжения на затворе определить напряжение на стоке, соответствующее насыщению тока стока.

6. Провести аналитическое описание ВАХ транзистора в области линейного нарастания тока и в области насыщения.

7. Дать определение удельной крутизны, какие параметры и как влияют на крутизну.

8. Что такое сопротивление канала в открытом состоянии?

9. Какая связь между сопротивлением канала и крутизной?

10. Привести условные графические изображения различных типов МДП-транзисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учебник / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА–М, 2011. – 681 с.
2. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы : учеб. для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 5-е изд. – СПб. : Лань, 2001. – 479 с.
3. Колосницын, Б. С. Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы : учеб. пособие / Б. С. Колосницын, П. П. Стещенко, В. В. Шульгов. – Минск : Амалфея, 2002. – 272 с.
4. Лачин, В. И. Электроника : учеб. пособие для вузов / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – 8-е изд. – Ростов н/Д : Феникс, 2010. – 703 с.
5. Булычев, А. Л. Электронные приборы / А. Л. Булычев, П. М. Лямин, Е. С. Тулинов. – Минск : Выш. шк., 1999. – 416 с.
6. Электронные приборы : электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины / Ю. А. Козусев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by/handle/220612/2009>.
7. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы : справочник / А. В. Баюков [и др.] ; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – М. : Энергоиздат, 1982.
8. Транзисторы для аппаратуры широкого применения : справочник / К. М. Брежнев [и др.] ; под ред. Б. Л. Перельмана. – М. : Радио и связь, 1981.

Содержание

<i>Лабораторная работа № 1. Полупроводниковые диоды</i>	3
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование полупроводниковых стабилитронов</i>	19
<i>Лабораторная работа № 3. Статические характеристики транзистора в схеме с общей базой</i>	30
<i>Лабораторная работа № 4. Статические характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером</i>	45
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование статических характеристик и параметров полевых транзисторов с $p-n$-переходом</i>	53
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование МДП-транзистора</i>	65
<i>Литература</i>	79

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Козусев Юрий Андреевич
Красовская Наталья Александровна

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Практикум
по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине для студентов
специальности 1-53 01 07 «Информационные
технологии и управление в технических системах»
дневной формы обучения

Электронный аналог печатного издания

Редактор *А. В. Власов*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 12.06.19.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,94.

Изд. № 1.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель