

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

##### 3.1. Цель работы

1. Изучить устройство, принцип действия, систему обозначений, параметры и характеристики полупроводниковых диодов, типовые схемы включения и области их применения.

2. Экспериментально исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов, указанных в карточке задания, и рассчитать по измеренным характеристикам их параметры.

##### 3.2. Краткие теоретические сведения

*Полупроводниковым диодом* называют электропреобразовательный прибор с одним или несколькими электрическими переходами и двумя выводами для подключения к внешней цепи. Принцип действия большинства диодов основан на использовании физических явлений в электрических переходах.

*Электрический переход* – переходный слой в полупроводниковом материале между двумя областями с различными типами электропроводности или разными значениями удельной электрической проводимости (одна из областей может быть металлом).

В зависимости от функционального назначения, уровня требуемых электрических параметров в диодах используются следующие типы выпрямляющих и омических электрических переходов.

*Выпрямляющий переход* – электрический переход, электрическое сопротивление которого при одном направлении тока больше, чем при другом.

*Омический переход* – электрический переход, электрическое сопротивление которого не зависит от направления тока в заданном диапазоне значений токов.

*Электронно-дырочный переход (p-n-переход)* – электрический переход между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электропроводность n-типа, а другая p-типа.

*Гетерогенный переход (гетеропереход)* – электрический переход, образованный в результате контакта полупроводников с различной шириной запрещенной зоны.

*Гомогенный переход (гомопереход)* – электрический переход, образованный в результате контакта полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны.

*Переход Шотки* – электрический переход, образованный в результате контакта между металлом и полупроводником.

*Электронно-электронный переход (n-n<sup>+</sup>-переход)* – электрический переход между двумя областями полупроводника n-типа, обладающими различными значениями удельной электрической проводимости.

**Дырочно-дырочный переход ( $p$ - $p^+$ -переход)** – электрический переход между двумя областями полупроводника  $p$ -типа, обладающими различными значениями удельной электрической проводимости. Знак «+» условно обозначает область с более высокой удельной электрической проводимостью.

**Динамическое равновесие  $p$ - $n$ -перехода.** Образование электронно-дырочного перехода вблизи границы, разделяющей области полупроводника с различным типом электропроводности, обусловлено следующими явлениями. Диффузия основных носителей  $p$ - и  $n$ -областей в противоположную область приводит к возникновению вблизи границы объемных электрических зарядов – положительного в  $n$ -области и отрицательного в  $p$ -области, как показано на рис. 3.1, а. Эти заряды обусловлены появлением нескомпенсированных ионизированных атомов донорной примеси (положительные неподвижные заряды) в  $n$ -области и нескомпенсированных ионизированных атомов акцепторной примеси (отрицательные неподвижные заряды) в  $p$ -области.

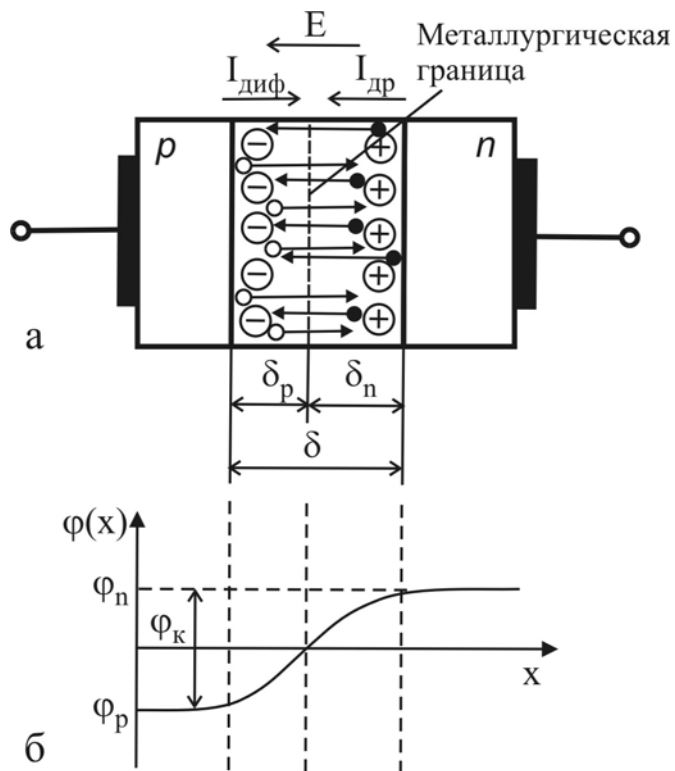


Рис. 3.1

Между нескомпенсированными зарядами в  $n$ - и  $p$ -областях возникает электрическое поле напряженностью  $E$ , называемое *внутренним*, и *контактная разность потенциалов* (рис. 3.1, б):

$$\phi_k = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}, \quad (3.1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $q$  – заряд электрона;  $N_a$ ,  $N_d$  – концентрация акцепторной и донорной примеси соответственно;  $n_i$  – концентрация примеси в собственном полупроводнике;  $\phi_p$ ,  $\phi_n$  – электрический потенциал  $p$ - и  $n$ -областей соответственно. Электрическое поле препятствует дальнейшей диффузии носителей заряда через переход, при этом возникает потенциальный энергетический барьер для основных носителей величиной  $\Delta W = q\phi_k$ .

Вектор напряженности внутреннего электрического поля в  $p$ - $n$ -переходе направлен от  $n$ -области к  $p$ -области. Поэтому возникшее электрическое поле вызывает дрейфовый перенос носителей из области, где они являются неосновными, в ту область, где они становятся основными носителями. Электроны дрейфуют из  $p$ -области в  $n$ -область, а дырки наоборот. Дрейфовый ток  $I_{\text{др}}$  имеет направление, встречное диффузионному  $I_{\text{диф}}$ . При отсутствии внешних воз-

действий на переход устанавливается состояние динамического равновесия, при котором суммарный ток через переход равен нулю:  $I_{др} + I_{диф} = 0$ , т.е. число диффундирующих носителей равно числу дрейфующих носителей.

*Ширина перехода  $\delta$  определяется следующим выражением:*

$$\delta = \delta_p + \delta_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varphi_k}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}, \quad (3.2)$$

где  $\varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\delta_p$ ,  $\delta_n$  – глубина проникновения перехода в p- и n-область соответственно.

Область p-n-перехода, характеризующуюся низкой концентрацией подвижных носителей заряда, можно рассматривать как квазидиэлектрик, поскольку подвижные носители заряда из нее удаляются внутренним электрическим полем и диффузией. По этой причине p-n-переход часто называют *обедненным слоем*.

**Прямое включение p-n-перехода.** Если к переходу подключить внешний источник с напряжением  $U_{пр}$ , как показано на рис. 3.2, а, таким образом, что вектор напряженности образованного им электрического поля  $E_{внеш}$  будет направлен встречно вектору напряженности внутреннего поля  $E$ , то в результате уменьшится разность потенциалов между областями (рис. 3.2, б):

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_k - U_{пр}, \quad (3.3)$$

напряженность суммарного электрического поля в p-n-переходе также уменьшится:

$$E_{\Sigma} = E - E_{внеш}, \quad (3.4)$$

соответственно снизится высота потенциального барьера до величины  $\Delta W = q(\varphi_k - U_{пр})$  и сузится область p-n-перехода. Причем зависимость ширины перехода от напряжения на нем описывается выражением

$$\delta(U_{пр}) = \sqrt{\frac{2\varepsilon(\varphi_k - U_{пр})}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}. \quad (3.5)$$

Большое число основных носителей оказывается способным преодолеть снизившийся потенциальный барьер p-n-перехода, и через него начинает протекать значительный ток, который будет расти при увеличении приложенного напряжения, поскольку будет расти число носителей, способных преодолеть пониженный потенциальный барьер. Диффузионная составляющая тока через p-n-переход будет значительно выше дрейфовой составляющей  $I_{диф} \gg I_{др}$ . Ток, протекающий через переход, называют прямым током  $I_{пр}$ , а напряжение рассмотренной полярности называется прямым напряжением  $U_{пр}$  и считается положительным. При прямом включении p-n-перехода происходит *инжекция* носителей заряда – диффузионный перенос основных носителей в область, где они становятся неосновными.

Большинство полупроводниковых диодов выполняют на основе *несимметричных p-n-переходов*, в которых концентрация легирующей примеси в одной из областей перехода много выше, чем в другой области. В таком переходе

более легированную область называют *эмиттер*, а менее легированную – *база*. Инжекцию в таких переходах можно считать односторонней, поскольку преобладает инжекция носителей из эмиттера в базу.

**Обратное включение р-п-перехода.** Если к переходу подключить внешний источник с напряжением  $U_{обр}$ , как показано на рис. 3.3, а, таким образом, что вектор напряженности образованного им электрического поля  $E_{внеш}$  будет сонаправлен с вектором напряженности внутреннего поля  $E$ , то в результате увеличится разность потенциалов между областями (рис. 3.3, б):

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_k + U_{обр}, \quad (3.6)$$

напряженность суммарного электрического поля в р-п-переходе также увеличится

$$E_{\Sigma} = E + E_{внеш}, \quad (3.7)$$

соответственно повысится высота потенциального барьера до величины  $\Delta W = q(\varphi_k + U_{обр})$  и расширится область р-п-перехода. Зависимость ширины перехода от обратного напряжения на нем описывается выражением

$$\delta(U_{обр}) = \sqrt{\frac{2\varepsilon(\varphi_k + U_{обр})}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}. \quad (3.8)$$

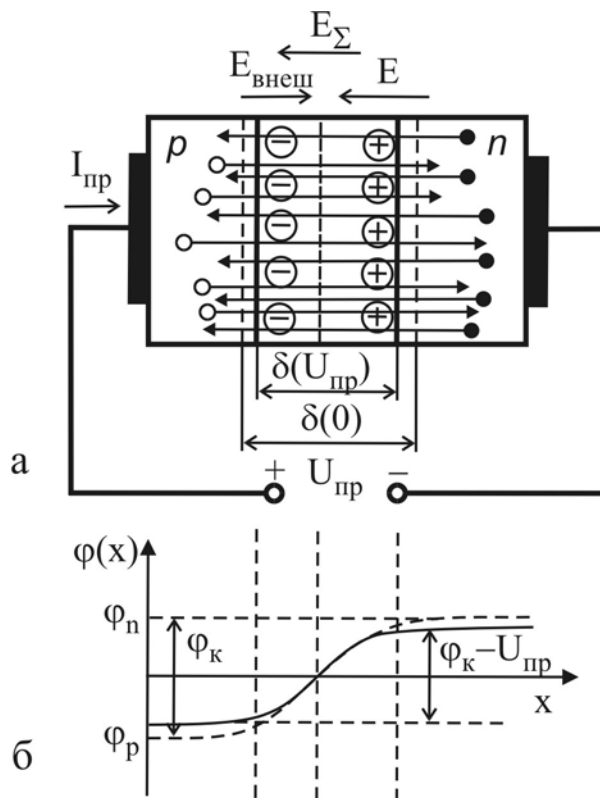


Рис. 3.2

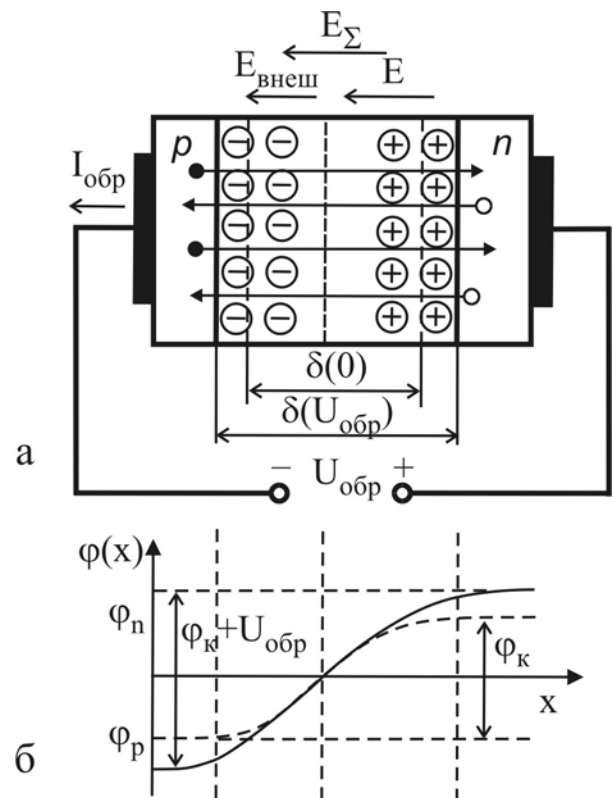


Рис. 3.3

В таких условиях основные носители оказываются неспособными преодолеть повысившийся потенциальный барьер р-п-перехода, и через него протекает незначительный по величине ток неосновных носителей, для которых

суммарное поле перехода является ускоряющим, т.е.  $I_{др} \gg I_{диф}$ . Таким образом, обратный ток перехода в отличие от прямого является дрейфовым, его величина практически не зависит от напряжения, поскольку не меняется число носителей, создающих его. Напряжение рассмотренной полярности называется обратным напряжением  $U_{обр}$  и считается отрицательным. При обратном включении р-п-перехода происходит *экстракция* носителей заряда – дрейфовый перенос неосновных носителей в область, где они становятся основными.

**Классификация диодов.** Диоды классифицируются: по материалу (селеновые, германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые); структуре перехода (точечные, плоскостные); назначению (выпрямительные, импульсные, стабилитроны и т.д.); диапазону частот (низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные диоды (СВЧ-диоды)); виду вольт-амперной характеристики и т.д.

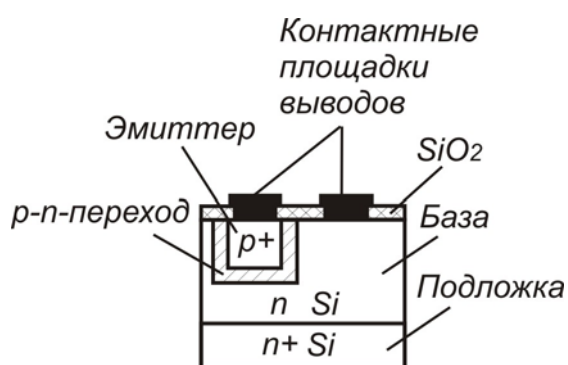


Рис. 3.4

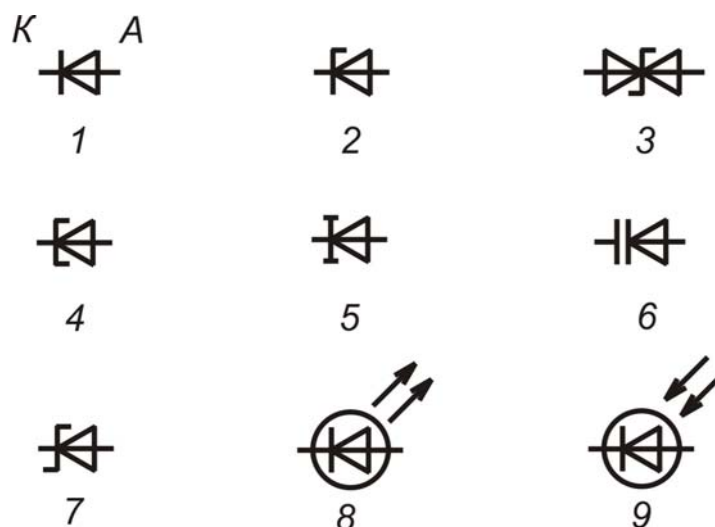
В зависимости от технологических процессов, используемых при изготовлении диодов, различают: микросплавные, сплавные, диффузионные, планарно-эпитаксиальные диоды и их разновидности. Устройство полупроводникового диода, изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии, приведено на рис. 3.4. Вся структура с электрическим переходом заключается в металлический, стеклянный, керамический или пластмассовый корпус для исключения влияния окружающей среды.

**Система обозначений полупроводниковых диодов.** Для маркировки полупроводниковых диодов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.919-81.

Первый элемент – буква или цифра, характеризует используемый материал: Г(1) – германий (Ge); К(2) – кремний (Si); А(3) – галлий (Ga) и его соединения; И(4) – индий In и его соединения. Второй элемент – буква, характеризует функциональное назначение диода: Д – выпрямительный; В – варикап; И – туннельный и обращенный; С – стабилитрон и стабистор; Л – излучающий светодиод. Третий элемент – цифра, характеризует назначение диода и содержит информацию о специальных параметрах диода. Например, для диодов группы Д: 1 – выпрямительные маломощные (ток до 300 мА); 2 – выпрямительные средней мощности (ток до 10 А); 3 – диоды большой мощности (ток свыше 10 А); 4–9 – диоды импульсные с различным временем восстановления. Четвертый элемент (2–3 цифры) – порядковый номер разработки (для стабилитрона – напряжение стабилизации в десятых долях вольта). Пятый элемент – буква, характеризует группу диодов с различными параметрами.

Условные графические обозначения полупроводниковых диодов на схемах электрических принципиальных представлены на рис. 3.5. Выводы диода

называются катод и анод. *Катод* – вывод прибора, через который ток вытекает во внешнюю цепь. *Анод* – вывод прибора, через который ток втекает в прибор



1 – общее обозначение (выпрямительный, импульсный, высокочастотный диод); 2 – стабилитрон; 3 – двуханодный стабилитрон; 4 – туннельный диод; 5 – обращенный диод; 6 – варикап; 7 – диод Шотки; 8 – светодиод; 9 – фотодиод

Рис. 3.5

из внешней цепи.

### **Вольт-амперная характеристика, пробой и общие параметры диодов.**

Зависимость тока, протекающего через диод, от величины и полярности приложенного к его выводам внешнего напряжения называется ВАХ диода:

$$I(U) = I_0(T) \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) = I_0(T) \left( e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right), \quad (3.9)$$

где  $\Phi_T = kT/q$  – тепловой потенциал, равный 26 мВ при  $T=300$  К;  $I_0(T)$  – *обратный ток насыщения*, сильно зависящий от температуры. Уравнение (3.9) называют *теоретической, или идеализированной, ВАХ диода*. В нем не учтено *последовательное сопротивление потерь диода*, т.е. суммарное эквивалентное активное сопротивление кристалла, омических контактов и выводов диода  $r_{\Pi}$ .

С учетом этого сопротивления реальная ВАХ диода имеет вид

$$I(U) = I_0 \left( e^{\frac{q(U - r_{\Pi} I)}{kT}} - 1 \right). \quad (3.10)$$

На рис. 3.6 изображены реальная ВАХ (сплошная линия) и теоретическая ВАХ (пунктирная линия). Из-за существенного различия значений прямого и об-

ратного токов и напряжений прямые и обратные ветви ВАХ выполнены в разном масштабе. Прямая ветвь реальной ВАХ, как следует из (3.10), сдвинута в сторону больших значений прямых напряжений при  $I_{пр} = \text{const}$ . Различие между теоретической и реальной ВАХ в области обратных напряжений обусловлено неучтенной в (3.9) и (3.10) тепловой генерацией носителей заряда в обедненном слое. С ростом обратного напряжения  $U_{обр}$  ширина  $\delta$ , а значит, и объем обедненного слоя растет, что приводит к росту числа процессов термогенерации электронно-дырочных пар, которые полем обратновключенного перехода выносятся из области перехода, увеличивая обратный ток. Поэтому  $I_{обр}$  не остается постоянным, а медленно возрастает с ростом  $U_{обр}$ . Более того, при достижении обратным напряжением некоторого критического значения, называемого *напряжением пробоя*  $U_{проб}$ , наблюдается резкий рост обратного тока. Данное явление называется *пробоем перехода* диода (см. рис. 3.6, кривая а).

Различают два основных вида пробоя: *электрический пробой* и *тепловой*. В свою очередь электрический пробой делится на лавинный и туннельный. *Лавинный пробой* характерен для диодов с широкими переходами, образованными областями с невысокой концентрацией легирующей примеси ( $N < 10^{-17} \text{ см}^{-3}$ ). Если длина свободного пробега носителей заряда меньше ширины перехода, то при больших значениях обратного напряжения  $U_{обр}$  (от 7 до 400 В) носители заряда приобретают кинетическую энергию, достаточную для развития лавинообразного процесса ионизации атомов полупроводника, что и вызывает резкий рост обратного тока при почти неизменном  $U_{обр}$ .

*Туннельный пробой* развивается в диодах с очень узкими переходами, образованными областями с высокой концентрацией легирующей примеси ( $N > 10^{-18} \text{ см}^{-3}$ ). Туннельный пробой р-n-перехода обусловлен квантово-механическим *туннельным эффектом*, когда из-за малой толщины энергетического потенциального барьера имеется высокая вероятность прохождения зарядов сквозь него без изменения энергии. При определенном обратном напряжении происходит туннельное проникновение электронов валентной зоны р-области на свободные энергетические уровни зоны проводимости n-области.

В планарных диодах (см. рис. 3.4) электрический пробой происходит на участке перехода, выходящем на поверхность полупроводниковой структуры, так называемый *поверхностный пробой*. Это обусловлено наличием на поверхности n-базы диода положительного объемного заряда, который приводит к уменьшению толщины перехода вблизи поверхности и соответствующему уменьшению напряжения пробоя.

*Тепловой пробой* возникает вследствие перегрева электрического перехода протекающим через него обратным током при недостаточном теплоотводе. За счет термогенерации носителей в переходе возрастает обратный ток диода, и рост

подводимой к диоду мощности  $U_{обр}I_{обр}$  приводит к еще большему разогреву перехода. Если температура диода превысит допустимое значение, структура перехода претерпевает необратимые изменения, и диод выходит из строя. На участке теплового пробоя (см. рис. 3.6, кривая б)  $U_{обр}$  уменьшается при возрастании  $I_{обр}$ .

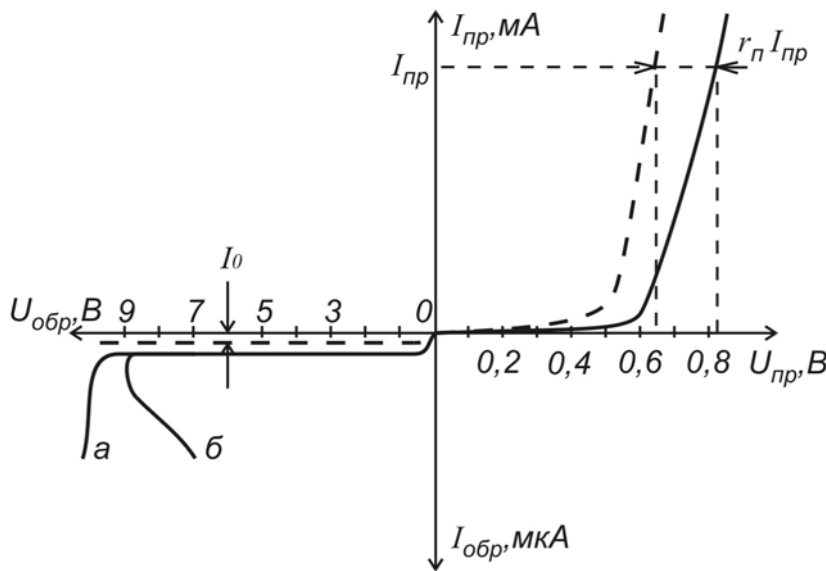


Рис. 3.6

диодa при фиксированном напряжении  $U_{пр}$  или уменьшается падение напряжения на диоде при фиксированном прямом токе  $I_{пр}$ . Влияние температуры на прямую ветвь ВАХ диода оценивают *температурным коэффициентом напряжения*  $TKH = \Delta U_{пр} / \Delta T|_{I_{пр} = \text{const}}$ , численно равным изменению прямого напряжения

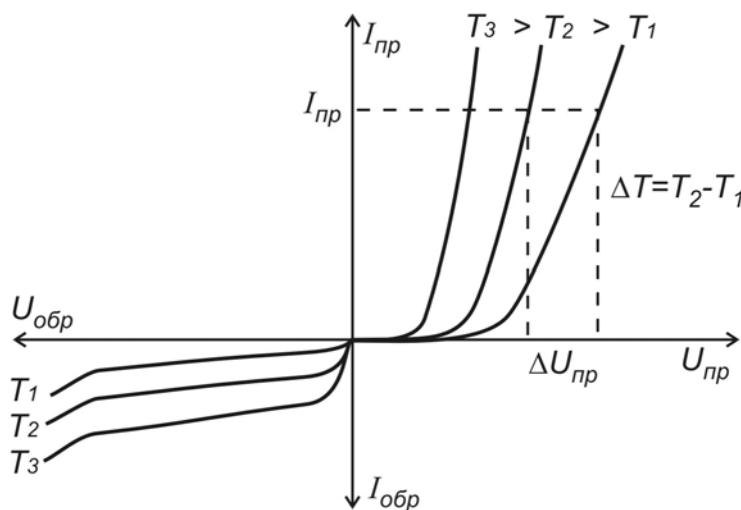


Рис. 3.7

На ВАХ диода существенно влияет температура окружающей среды (рис. 3.7). С ростом температуры ток  $I_0$  возрастает по экспоненциальному закону  $e^{-\Delta W/kT}$ , где  $\Delta W$  – ширина запрещенной зоны материала полупроводника. В инженерных расчетах полагают, что ток  $I_0$  удваивается на каждые  $10^\circ\text{C}$  в германиевых диодах, а в кремниевых на каждые  $7^\circ\text{C}$ .

С ростом температуры растет прямой ток

диодa при увеличении температуры на  $1^\circ\text{C}$ . При расчетах для большинства диодов принимают  $TKH = -2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ .

Диоды характеризуются рядом параметров, которые являются общими для всех типов диодов. К ним относятся:

рабочий диапазон температур перехода  $T_{min} \dots T_{max}$ ;

максимально допустимый прямой ток  $I_{пр max}$ , при



котором температура перехода достигает максимального значения  $\dot{O}_{m\grave{a}\tilde{o}}$ ;

максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр\ max}$ , при котором не происходит пробоя р-п-перехода, обычно  $U_{обр\ max} < 0,8 U_{проб}$ ;

прямая и обратная максимально допустимая мощность, рассеиваемая на диоде:

$$P_{i\grave{o}\ max} = (T_{i\grave{a}x} - T_0) / R_T ; \quad (3.11)$$

$$P_{i\grave{a}\tilde{o}\ max} = (T_{i\grave{i}n} - T_0) / R_T , \quad (3.12)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды;  $R_T$  – тепловое сопротивление перехода, характеризующее условия теплоотвода;

прямое и обратное статическое сопротивление диода (сопротивление постоянному току):

$$R_{пр} = U_{пр} / I_{пр} ; \quad R_{обр} = U_{обр} / I_{обр} ; \quad (3.13)$$

прямое и обратное дифференциальное сопротивление (сопротивление переменному току):

$$r_{пр} = \Delta U_{пр} / \Delta I_{пр} ; \quad r_{обр} = \Delta U_{обр} / \Delta I_{обр} . \quad (3.14)$$

Дифференциальное сопротивление диода значительно меньше статического.

Величину  $K_v = I_{пр} / I_{обр} = e^{U_{пр} / U_T} \gg 1$  называют коэффициентом выпрямления (характеризует односторонний характер проводимости диода, т.к.  $I_{пр} \gg I_{обр}$ ).

Способность диода накапливать электрические заряды отражается его емкостными параметрами. Существует два механизма накопления зарядов, которые описываются двумя емкостными параметрами.

*Барьерная емкость* отражает наличие объемного электрического заряда ионизированных атомов примеси в р-п-переходе, который можно рассматривать как плоский конденсатор. Расстояние между обкладками этого конденсатора определяется шириной р-п-перехода  $\delta$ . Выражение для зависимости барьерной емкости от напряжения на переходе имеет вид

$$C_{бар}(U) = \varepsilon \frac{S}{\delta(U)} = \frac{C_0}{(1 + U/\phi_k)^\gamma} , \quad (3.15)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения перехода;  $C_0 = S \sqrt{\frac{\varepsilon q}{2\phi_k} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$  – величина

на барьерной емкости при нулевом напряжении на переходе  $U = 0$ ;  $\gamma = 1/3 \dots 1/2$  – параметр, значение которого определяется профилем легирования перехода;  $U$  – обратное напряжение на переходе. Величина барьерной емкости составляет десятки – сотни пикофарад, поэтому ее действие проявляется практически только при обратном включении, когда переход закрыт и протекают малые обратные токи.

*Диффузионная емкость* отражает накопление электрического заряда неосновных неравновесных носителей в р- и п-областях при прямом включении перехода. Величина диффузионной емкости пропорциональна прямому току перехода:

$$C_{\text{диф}} = \frac{\tau_{\text{эф}} I_{\text{н}}}{\varphi_T} = \frac{\tau_{\text{эф}}}{r_{\text{н}}}, \quad (3.16)$$

где  $\tau_{\text{эф}}$  – эффективное время жизни неосновных неравновесных носителей. При прямом токе перехода 10 мА величина диффузионной емкости составляет десятки – сотни нанофард. В случае несимметричного перехода накопление неравновесных носителей происходит преимущественно в базе диода.

Кроме общих параметров диоды характеризуются *специальными параметрами*, присущими только данному типу диодов.

**Выпрямительные диоды** предназначены для преобразования переменного тока с частотой от 50 до 20 000 Гц в пульсирующий ток одного направления и широко используются в источниках питания радиоэлектронной аппаратуры различного назначения. В качестве полупроводникового материала для таких диодов ранее использовали германий, в настоящее время – кремний и арсенид галлия. Принцип работы выпрямительных диодов основан на вентильном свойстве р-п-перехода. Выпрямительные диоды подразделяются на диоды малой, средней и большой мощности. Диоды малой мощности предназначены для выпрямления токов до 300 мА, средней и большой мощности – для выпрямления токов соответственно от 300 мА до 10 А и от 10 до 1000 А. Преимущества кремниевых диодов по сравнению с германиевыми: малые обратные токи; возможность использования при более высоких температурах окружающей среды и больших значениях обратных напряжений. Преимущество германиевых диодов – малое падение напряжения 0,3...0,6 В при протекании прямого тока (по сравнению с 0,8...1,2 В у кремниевых).

В качестве выпрямительных диодов используют плоскостные, сплавные, диффузионные и эпитаксиальные диоды, выполненные на основе несимметричных р-п-переходов. Барьерная емкость перехода из-за большой площади велика и ее значение достигает десятков пикофард. Германиевые диоды могут быть использованы при температурах не более 70...80 °С, кремниевые – до 120...150 °С, арсенид-галлиевые – до 240...280 °С. Другим преимуществом диодов из арсенида галлия является значительно большая подвижность носителей, что позволяет их использовать на частотах до 100...500 кГц.

Максимальное обратное напряжение маломощных низкочастотных выпрямительных диодов лежит в пределах от нескольких десятков до 1200 В. Для более высокого напряжения промышленностью выпускаются выпрямительные столбы, использующие несколько последовательно соединенных диодов в одном корпусе. Обратные токи не превышают 300 мкА для германиевых диодов и 10 мкА – для кремниевых.

Мощные (силовые) диоды различаются по частотным свойствам и работают на частотах в диапазоне от десятков герц до десятков килогерц и изготавливаются преимущественно из кремния.

Работа при больших прямых токах и высоких обратных напряжениях связана с выделением значительной мощности в р-п-переходе. Поэтому в установках с диодами средней и большой мощности используются охладители – радиаторы с воздушным и жидкостным охлаждением. При воздушном охлаждении тепло отводится с помощью радиатора. При этом охлаждение может быть естественным (за счет конвекции воздуха) или принудительным (с использованием обдува корпуса прибора и радиатора с помощью вентилятора). При жидкостном охлаждении в радиатор по специальным каналам пропускается теплоотводящая жидкость (вода, антифриз, трансформаторное масло, синтетические диэлектрические жидкости).

К основным параметрам выпрямительных диодов относятся:

- максимально допустимый прямой ток  $I_{\text{пр max}}$ ;
- прямое падение напряжения на диоде  $U_{\text{пр}}$  (при  $I_{\text{пр max}}$ );
- максимально допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр max}}$ ;
- обратный ток при заданном обратном напряжении  $I_{\text{обр}}$  (при  $U_{\text{обр max}}$ );
- диапазон рабочих температур окружающей среды;
- коэффициент выпрямления  $K_v$ ;
- предельная частота выпрямления, соответствующая уменьшению коэффициента выпрямления в 2 раза.

На рис. 3.8 показана схема двухполупериодного выпрямителя – типовая схема включения выпрямительных диодов. Данное название обусловлено тем, что ток через нагрузку протекает в течение обоих полупериодов входного напряжения. Схема состоит из понижающего трансформатора Т, диодного моста, в плечи которого включены четыре диода VD1 – VD4, и сглаживающего конденсатора С. Переменное напряжение подается в одну диагональ моста, а нагрузка подключена к другой. При действии положительной полуволны входного напряжения открыты диоды VD2, VD3, а при действии отрицательной полуволны – VD1, VD4. Форма входного, выходного напряжения и тока нагрузки в данной схеме показана на рис. 3.9. Конденсатор в данной схеме обеспечивает сглаживание пульсирующего напряжения на нагрузке за счет заряда от источника в течение части периода и разряда через нагрузку в течение промежутка времени, равного практически половине периода входного напряжения  $\Delta t_{\text{разр}} \approx T / 2 = 1 / (2 \cdot f)$ . Емкость конденсатора, обеспечивающая амплитуду пульсаций напряжения на нагрузке  $\Delta U_{\text{вых}}$  при максимальном токе нагрузки  $I_{\text{н m}}$ , определяется согласно выражению

$$C = I_{\text{н m}} / (2 \Delta U_{\text{вых}} f). \quad (3.17)$$

Максимальное значение обратного напряжения, которое прикладывается к одному диоду при действии отрицательной полуволны в данной схеме, практически равно амплитуде входного напряжения:

$$U_{\text{м обр}} \approx U_{\text{вх m}}. \quad (3.18)$$

**Высокочастотные (детекторные) диоды** предназначены для выпрямления электрических сигналов высокой частоты. Обозначаются и маркируются так же,

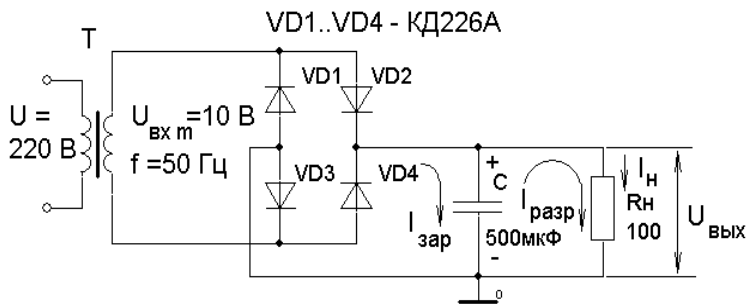


Рис. 3.8

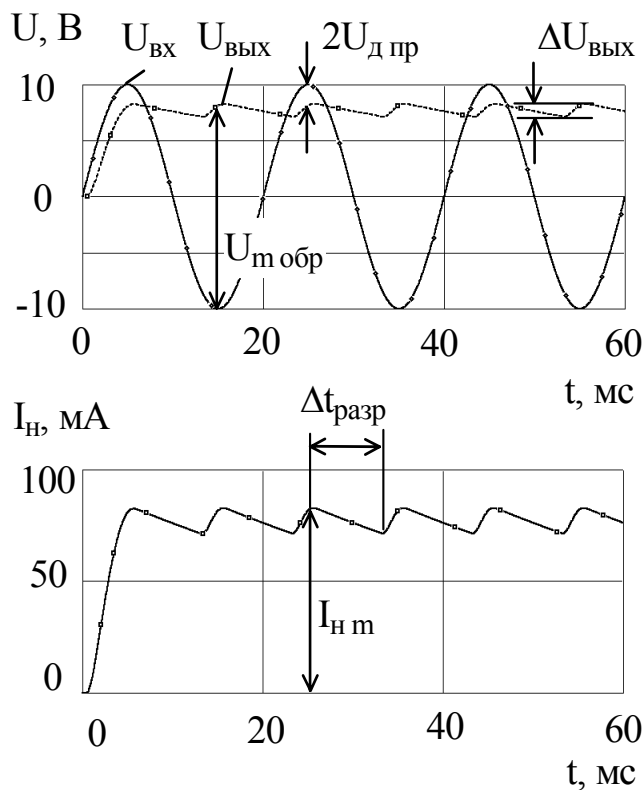


Рис. 3.9

Уменьшение емкости корпуса  $C_K$  достигается применением корпусов специальной конструкции. С этой же целью высокочастотные диоды часто выполняются вообще без корпуса, в этом случае они используются как составная часть гибридной интегральной схемы или модуля, который размещается в герметичном корпусе.

Прямая ветвь ВАХ точечного диода практически не отличается от реальной ВАХ р-п-перехода, а обратная ветвь не имеет ярко выраженного участка насыщения, что объясняется процессами генерации носителей заряда в неоднородном поле точечного контакта, вызванной лавинным умножением.

как и выпрямительные низкой частоты. Используются в радиоприемной, телевизионной и другой аппаратуре (в детекторах и демодуляторах). Требования по величине  $U_{обр max}$  и  $I_{пр max}$  значительно ниже, чем в выпрямительных низкочастотных. В высокочастотных диодах стремятся получить минимальное значение собственной емкости, поскольку на достаточно высоких частотах реактивное сопротивление этой емкости имеет величину ниже, чем обратное сопротивление р-п-перехода диода, т.е. эффект выпрямления (детектирования) резко снижается. Для уменьшения площади р-п-перехода, а следовательно, и его емкости используют точечную конструкцию диода. Барьерная емкость точечных диодов не превышает 1 пФ, а рабочая частота составляет 150 МГц и более.

Емкость диода складывается из емкости корпуса и емкости р-п-перехода ( $C_D = C_K + C_{п}$ ).

**Импульсные диоды** предназначены для работы в импульсных и цифровых устройствах. Обозначаются так же, как и выпрямительные, имеют малую длительность переходных процессов. От выпрямительных диодов отличаются малыми емкостями р-n-перехода (доли пикофарад) и характеризуются рядом параметров, определяющих переходные характеристики диода. Уменьшение емкостей достигается за счет уменьшения площади р-n-перехода, поэтому допустимые мощности рассеяния у них невелики (30...40 мВт).

При воздействии на диод коротких по времени прямоугольных импульсов напряжения или тока форма тока через диод или напряжения на нем будет отличаться от прямоугольной, что обусловлено инерционностью процессов накопления и рассасывания носителей в базе и перезарядом его барьерной емкости. При малых уровнях напряжения и тока длительность переходных процессов определяется барьерной емкостью, а при больших – диффузионной.

На рис. 3.10 показаны переходные процессы в диоде при высоких уровнях напряжения и тока. При подаче на диод прямого напряжения ток устанавливается не сразу, так как с течением времени происходит накопление инжектированных неосновных носителей в базе и снижение ее сопротивления. Передний фронт импульса тока получается искаженным (см. рис. 3.10, а). Однако данный процесс оказывается гораздо короче, чем процессы при переключении диода с прямого напряжения на обратное, которые характеризуются временем обратного восстановления  $t_{\text{вос}}$ . При этом первоначально резко увеличивается величина обратного тока до  $I_{\text{обр m}}$  вследствие интенсивного рассасывания неравновесных носителей базы с последующим его экспоненциальным уменьшением до стационарного значения, равного обратному току насыщения  $I_0(T)$  в (3.9). При пропускании импульса прямого тока через диод в первый момент времени наблюдается выброс напряжения (см. рис. 3.10, б), что вызвано повышенным падением напряжения, пока инжектированные носители, накопившись в базе, не понизят ее сопротивление. Этот процесс описывается параметром диода, который называется *время установления прямого напряжения*  $t_{\text{уст}}$ . После выключения прямого тока на диоде остается некоторое напряжение  $U_{\text{ост}}$ , величина которого зависит от количества инжектированных носителей. *Остаточное напряжение* уменьшается по мере рекомбинации носителей.

Для уменьшения  $t_{\text{вос}}$  необходимо уменьшить объем полупроводниковой структуры и увеличить скорость рекомбинации неосновных носителей, что достигается технологией изготовления импульсных диодов: введением в исходный материал нейтральных примесей, чаще всего золота (Au), для создания так называемых «ловушек» – центров рекомбинации.

Импульсные диоды характеризуются рядом специальных параметров:

– общая емкость диода  $C_d$  (десятые доли – единицы пикофарад);

- максимальное импульсное прямое напряжение  $U_{пр\ max}$  и;
- максимально допустимый импульсный ток  $I_{пр\ max}$  и;
- время установления прямого напряжения  $t_{уст}$  – интервал времени между началом протекания прямого тока через диод и моментом, когда прямое напряжение на диоде достигает 1,2 установившегося значения (доли наносекунд – доли микросекунд);
- время обратного восстановления диода  $t_{вос}$  – время переключения диода с заданного прямого тока на заданное обратное напряжение от момента прохождения тока через нулевое значение до момента достижения обратным током заданного значения (доли наносекунд – доли микросекунд).

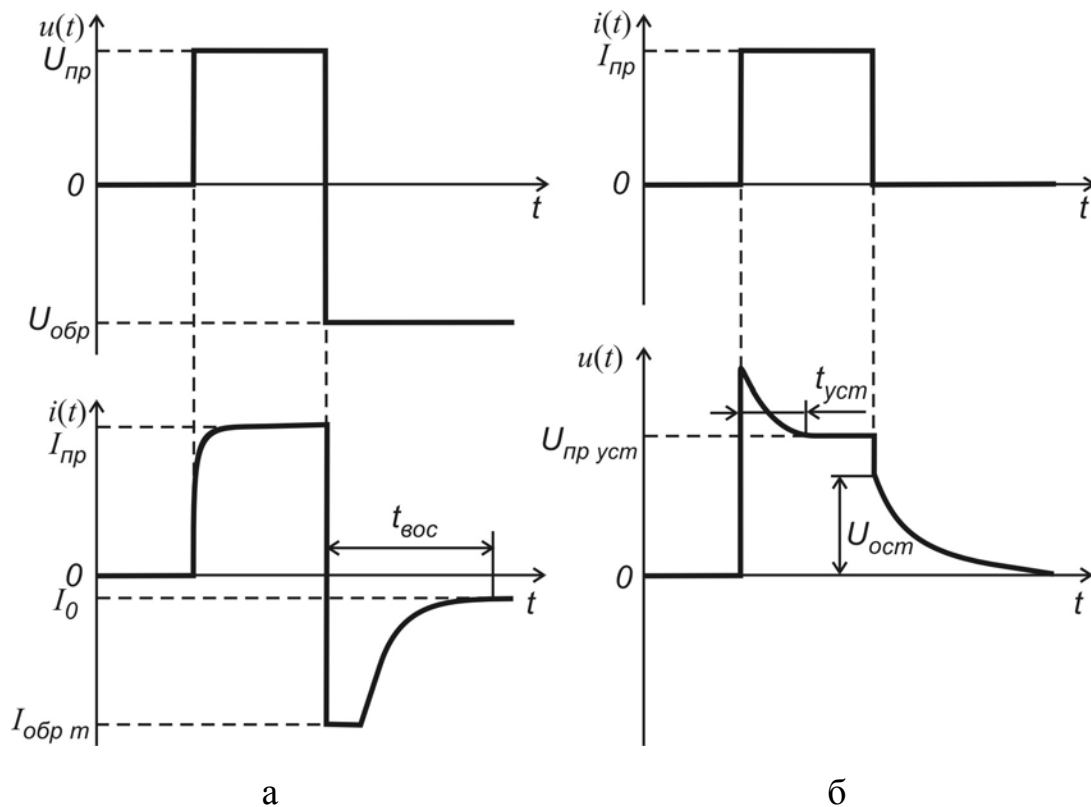


Рис. 3.10

Для уменьшения  $t_{вос}$  применяют специальные разновидности импульсных диодов: *диоды с барьером Шоттки (ДБШ)*, *диоды с накоплением заряда (ДНЗ)*. В ДБШ переход выполнен на основе выпрямляющего контакта металл-полупроводник, в котором работа выхода из металла выше, чем работа выхода из полупроводника. У этих диодов не затрачивается время на накопление и рассасывание зарядов в базе, их быстродействие зависит только от скорости процесса перезаряда барьерной емкости. Инжекция в таких диодах является односторонней, инжектируют электроны из полупроводника в металл, где они являются единственным типом носителей. По этой причине отсутствует накопле-

ние неосновных носителей в базе. Конструктивно ДБШ выполняются в виде пластины низкоомного кремния n-типа, на которую нанесена высокоомная эпитаксиальная пленка с электропроводностью того же типа. На поверхность пленки вакуумным напылением нанесен слой металла. Инерционность ДБШ в основном определяется барьерной емкостью выпрямляющего контакта, которая может быть меньше 0,01 пФ.

В ДНЗ база изготавливается неравномерно легированной по длине. Концентрация примеси в базе по мере приближения к р-n-переходу уменьшается, поэтому неравномерной оказывается и концентрация основных носителей базы – электронов, если база имеет проводимость n-типа. За счет этого электроны диффундируют в сторону р-n-перехода, оставляя в глубине базы избыточный положительный заряд атомов донорной примеси, а вблизи перехода избыточный заряд электронов. Между этими зарядами возникает электрическое поле, направленное в сторону перехода. Под действием этого поля дырки, инжектированные в базу при прямом включении диода, концентрируются (накапливаются) в базе у границы перехода. При переключении диода с прямого на обратное направление эти дырки под действием поля внутри перехода быстро уходят из базы в эмиттер, и время восстановления обратного сопротивления уменьшается. Для изготовления таких диодов применяется меза- и эпитаксиальная технология.

**Полупроводниковый стабилитрон** – полупроводниковый диод, напряжение на котором сохраняется с определенной точностью при протекании через него тока в заданном диапазоне, и предназначенный для стабилизации напряжения. Принцип действия стабилитронов основан на использовании электрического вида пробоя р-n-перехода при обратном смещении. В качестве стабилитронов используются плоскостные кремниевые диоды.

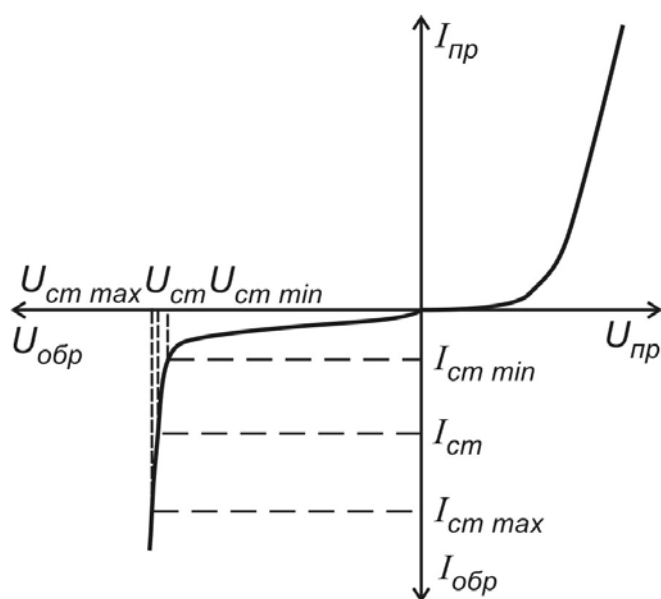


Рис. 3.11

Как показано на рис. 3.11, обратная ветвь ВАХ имеет участок со слабой зависимостью напряжения от величины обратного тока (участок с электрическим пробоем р-n-перехода). При изменении тока стабилитрона  $I_{ст}$  в диапазоне значений от  $I_{ст min}$  до  $I_{ст max}$  напряжение на стабилитроне незначительно изменяется в пределах от  $U_{ст min}$  до  $U_{ст max}$ , что обуславливает небольшое значение дифференциального сопротивления стабилитрона:

$$r_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}} = \frac{U_{\text{ст max}} - U_{\text{ст min}}}{I_{\text{ст max}} - I_{\text{ст min}}}. \quad (3.19)$$

Напряжение стабилизации  $U_{\text{ст}}$  обычно определяется среднеарифметическим значением минимального и максимального тока стабилитрона:

$$I_{\text{ст}} = (I_{\text{ст min}} + I_{\text{ст max}}) / 2. \quad (3.20)$$

Величина обратного напряжения, при котором начинает развиваться электрический пробой, в значительной степени зависит от удельного сопротивления исходного материала, определяемого концентрацией примеси. В стабилитронах с напряжением стабилизации менее 5 В преобладает туннельный пробой, от 5 до 7 В наблюдаются оба вида электрического пробоя – туннельный и лавинный, а выше 7 В преобладает лавинный пробой. При изменении температуры напряжение стабилизации  $U_{\text{ст}}$  изменяется. Низковольтные и высоковольтные стабилитроны имеют противоположный знак изменения напряжения стабилизации при увеличении температуры. При туннельном пробое с ростом температуры  $U_{\text{ст}}$  уменьшается, а при лавинном – возрастает. В стабилитронах с напряжением стабилизации от 5 до 7 В влияние температуры незначительно, т.к. в переходе существуют оба вида пробоя.

Основными параметрами стабилитронов являются:

- напряжение стабилизации  $U_{\text{ст}}$  – падение напряжения на стабилитроне при протекании заданного тока стабилизации;

- минимальный  $I_{\text{ст min}}$  и максимальный  $I_{\text{ст max}}$  токи стабилитрона в режиме стабилизации;

- температурный коэффициент напряжения стабилизации

$$\text{ТКН}_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}} \Delta T} \cdot 100 \%, \left( \frac{\%}{^\circ\text{C}} \right) - \text{отношение относительного изменения}$$

напряжения стабилизации, выраженного в процентах, к вызвавшему его изменению температуры;

- дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_{\text{ст}}$ , определяемое на участке пробоя;

- статическое сопротивление  $R_0 = U_{\text{ст}} / I_{\text{ст}}$ .

Полупроводниковые диоды, предназначенные для стабилизации напряжений менее 1 В с использованием прямой ветви ВАХ, называются *стабисторами*. Для изготовления стабисторов используется кремний с высокой концентрацией примеси либо селен.

Устройство, предназначенное для стабилизации постоянного напряжения, в котором используется стабилитрон, называется *параметрическим стабилизатором напряжения*, поскольку его характеристики полностью определяются параметрами стабилитрона. Принципиальная схема такого стабилизатора представлена на рис. 3.12. Нагрузка подключена параллельно стабилитрону, при



этом напряжение на ней остается постоянным с определенной степенью точности. Ток стабилитрона, который задается гасящим или балластным резистором  $R_{\Gamma}$ , должен лежать в диапазоне значений  $I_{CT \min} \dots I_{CT \max}$ . Требуемое сопротивление резистора  $R_{\Gamma}$  находится согласно выражению

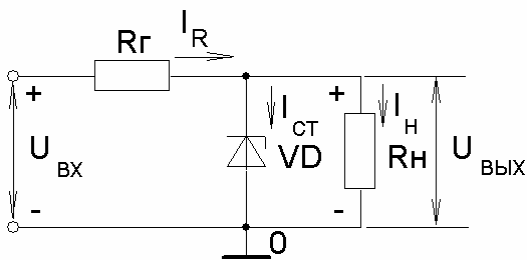


Рис. 3.12

$$R_{\Gamma} = \frac{U_{BX} - U_{ВЫХ}}{I_{CT} + I_H}, \quad (3.21)$$

где  $U_{ВЫХ} = U_{CT}$ , которое получено из уравнений, записанных по законам Кирхгофа для данной схемы.

**Варикап** – полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании зависимости емкости перехода от

обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью. Они делятся на подстроечные, или варикапы, и умножительные, или варакторы. Варикапы используются для изменения резонансной частоты колебательных контуров. Варакторы применяются для умножения частоты. График зависимости емкости варикапа от обратного напряжения, которая описывается выражением (3.14), показан на рис. 3.13.

Основными специальными параметрами варикапов являются:

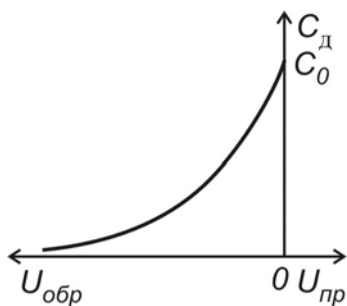


Рис. 3.13

– номинальная емкость  $C_d$ , измеренная при заданном обратном напряжении  $U_{обр}$ ;

– коэффициент перекрытия по емкости  $K_C = C_{d \max} / C_{d \min}$  – отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения;

– сопротивление потерь  $r_{\Pi}$  – суммарное активное сопротивление, включающее сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов;

– добротность  $Q_v = X_C / r_{\Pi}$  – отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к сопротивлению потерь;

– температурный коэффициент емкости  $\alpha_C = \frac{\Delta C}{C \Delta T} \cdot 100\% \left( \frac{\%}{^{\circ}C} \right)$  – отношение

относительного изменения емкости, выраженного в процентах, к вызывавшему его абсолютному изменению температуры окружающей среды.

Схема включения варикапа в колебательный контур показана на рис. 3.14. Обратное напряжение подается на варикап через высокоомный резистор  $R$ , предотвращающий шунтирование варикапа малым внутренним сопротивлением источника питания по переменному току. Разделительный конденсатор  $C_p$  устраняет шунтирование варикапа индуктивностью контура по постоянному току.

Кроме рассмотренных диодов выпускаются *туннельные диоды*, *диоды Ганна*, *лавинно-пролетные диоды*, работающие в диапазоне сверхвысоких час-

тот (0,3...300 ГГц), а также *фото- и излучательные диоды*, используемые в *фотоэлектрических и оптоэлектронных приборах* и в качестве *светоиндикаторных устройств*.

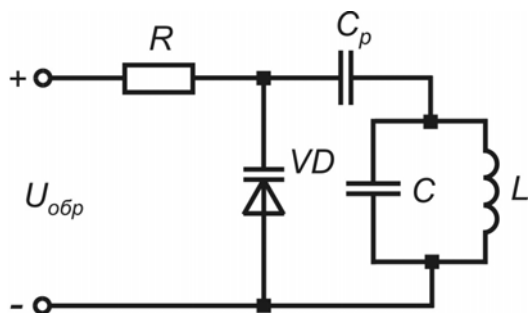


Рис. 3.14

### 3.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с электрическими параметрами диодов, приведенными в карточке задания, и определите области допустимых режимов работы, которые задаются максимально допустимыми параметрами.

**Для предотвращения электрического повреждения диодов измерения проводить только в области допустимых режимов работы.**

2. Соберите схему, приведенную на рис. 3.15, а, и исследуйте прямые ветви ВАХ диодов  $I_{пр} = f(U_{пр})$ , указанных в карточке задания.

3. Соберите схему, приведенную на рис. 3.15, б, и исследуйте обратные ветви ВАХ диодов  $I_{обр} = f(U_{обр})$ . Для исследования обратной ветви стабилизатора используйте схему, приведенную на рис. 3.15, в.

4. Соберите схему, приведенную на рис. 3.15, г, и проведите измерения обратного времени восстановления  $t_{вос}$  выпрямительного и импульсного диодов. В качестве генератора прямоугольных импульсов используйте низкочастотный генератор ГЗ-112 в режиме генерации меандра с амплитудой  $U_m = 5$  В. Частоту меандра выбрать самостоятельно исходя из удобства отсчета с помощью осциллографа времени восстановления  $t_{вос}$ . Сравните полученные результаты.

5. По построенным прямым ветвям ВАХ диодов рассчитайте: статическое сопротивление диода  $R_{пр}$  и дифференциальное сопротивление  $r_{пр}$  в точке  $I_{пр} = 8$  мА.

6. Для стабилитронов рассчитайте по построенным ВАХ статическое  $R_0$  и дифференциальное сопротивление  $r_{ст}$ .

7. Рассчитайте теоретическую ВАХ диода (3.9) при  $I_0 = 0,01$  мкА и  $T = 300$  К в диапазоне напряжений на диоде от  $-20$  до  $0,8$  В.

### 3.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрические схемы для измерения ВАХ полупроводниковых диодов.
3. Результаты экспериментальных исследований в виде таблиц и графиков.
4. Расчет параметров исследованных диодов.
5. Результаты расчета теоретической ВАХ в виде таблицы и графика.
6. Выводы.

### 3.5. Контрольные вопросы

1. Какой электронный прибор называют полупроводниковым диодом?
2. Какие виды электрических переходов используются в полупроводниковых диодах?
3. Какие явления происходят в р-п-переходе в состоянии динамического равновесия?
4. Как необходимо изменить концентрацию легирующих примесей для уменьшения ширины р-п-перехода?
5. Нарисуйте график зависимости барьерной емкости р-п-перехода от обратного напряжения.
6. Нарисуйте график зависимости диффузионной емкости р-п-перехода от прямого напряжения.
7. Чем отличается ВАХ реального диода от идеализированной ВАХ при прямом и обратном включении?
8. Как влияет изменение температуры на ВАХ диода?
9. Какие существуют виды пробоя р-п-перехода и в чем их отличие?
10. Какие физические явления и свойства выпрямляющих электрических переходов используются в выпрямительных и импульсных диодах, в стабилитронах и варикапах?
11. Назовите основные параметры выпрямительных, импульсных диодов, стабилитронов, варикапов.

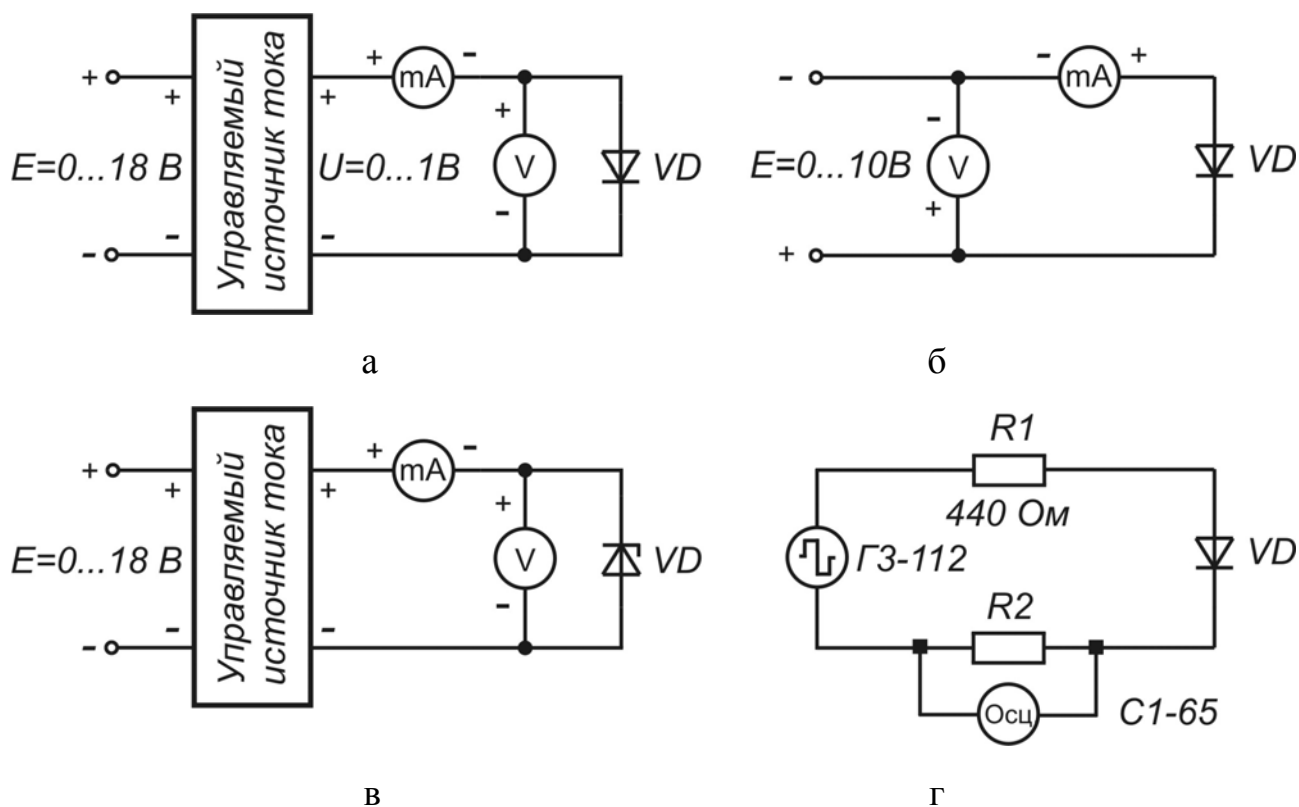


Рис. 3.15