

Значения диффузионной емкости могут иметь порядок от сотен до тысяч пикофарад. Поэтому при прямом напряжении емкость  $p$ - $n$ -перехода определяется преимущественно диффузионной емкостью, а при обратном напряжении — барьерной емкостью.

Схема замещения полупроводникового диода изображена на рис. 1.4. Здесь  $C_d$  — общая емкость диода, зависящая от режима;  $R_n$  — сопротивление перехода, значение которого определяют с помощью статической ВАХ диода ( $R_n = U/I$ );  $r_b$  — распределенное электрическое сопротивление базы диода, его электродов и выводов.

Иногда схему замещения дополняют емкостью между выводами диода  $C_B$ , емкостями  $C_{вх}$  и  $C_{вых}$  (показаны пунктиром) и индуктивностью выводов  $L_B$ .

## § 1.2. ТИПЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Выпрямительные диоды используют для выпрямления переменных токов частотой 50 Гц — 100 кГц. Основные параметры выпрямительных диодов даются применительно к их работе в однополупериодном выпрямителе с активной нагрузкой (без конденсатора, сглаживающего пульсации).

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

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

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

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

Превышение максимально допустимых величин  $U_{обр.мах}$ ,  $U_{обр.имах}$ ,  $I_{вл.ср.мах}$  ведет к резкому сокращению срока службы или пробою диода.

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

Высокочастотные (универсальные) и импульсные диоды применяют для выпрямления токов, модуляции и детектирования сигналов с частотами до нескольких сотен мегагерц. Импульсные диоды используют в качестве

ключевых элементов в устройствах с микросекундной и наносекундной длительностью импульсов.

Максимально допустимые обратные напряжения  $U_{обр\ max}$  ( $U_{обр.и\ max}$ ) — постоянные (импульсные) обратные напряжения, превышение которых резко сокращает долговечность диода или приводит к его немедленному повреждению.

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

Постоянный обратный ток  $I_{обр}$  — ток через диод при постоянном обратном напряжении на нем; измеряется, как правило, при максимальном обратном напряжении  $U_{обр\ max}$ . Чем меньше  $I_{обр}$ , тем качественнее диод.

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

При коротких импульсах необходимо учитывать инерционность процессов включения и выключения диода.

Время восстановления обратного сопротивления  $t_{вос}$  — интервал времени от момента переключения до момента, когда обратный ток уменьшается до заданного уровня отсчета  $I_{отс}$ . Если на диод, через который протекал прямой ток, подать обратное напряжение, то диод закроется не мгновенно; возникает импульс обратного тока, превышающий его установившееся значение. Этот импульс обусловлен рассасыванием накопленного в базе диода заряда переключения  $Q_{пк}$ . Приблизительно  $Q_{пк} \approx t_{вос} I_{обр.и}$ .

Там, где требуется малое время переключения, используют диоды Шотки. Они имеют переход металл — полупроводник, который обладает выпрямительным эффектом. Накопление заряда в переходе этого типа выражено слабо. Поэтому время переключения может быть уменьшено до значений порядка 100 пс. Другой особенностью этих диодов является малое (по сравнению с обычными кремниевыми диодами) прямое напряжение, составляющее около 0,3 В.

Стабилитроны предназначены для стабилизации напряжения на нагрузке при изменении питающего напряжения или сопротивления нагрузки, для фиксации уровня напряжения и т. д.

Для стабилитронов рабо-

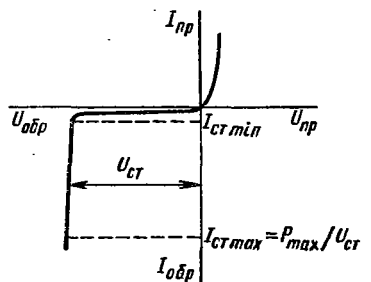


Рис. 1.5

чим является участок пробоя ВАХ в области обратных напряжений (рис. 1.5). На этом участке напряжение на диоде остается практически постоянным при изменении тока диода.

Стабилитрон характеризуется следующими параметрами: *напряжение стабилизации*  $U_{ст}$  — напряжение на стабилитроне в рабочем режиме (при заданном токе стабилизации); *минимальный ток стабилизации*  $I_{ст\ min}$  — наименьшее значение тока стабилизации, при котором режим пробоя устойчив; *максимально допустимый ток стабилизации*  $I_{ст\ max}$  — наибольший ток стабилизации, при котором нагрев стабилитронов не выходит за допустимые пределы.

*Дифференциальное сопротивление*  $r_{ст}$  — отношение приращения напряжения стабилизации к вызывающему его приращению тока стабилизации:  $r_{ст} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$ . К параметрам стабилитронов также относят *максимально допустимый прямой ток*  $I_{max}$ , *максимально допустимый импульсный ток*  $I_{пр. и\ max}$ , *максимально допустимую рассеиваемую мощность*  $P_{max}$ .

**В а р и к а п** — полупроводниковый диод, предназначенный для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью. При увеличении обратного напряжения емкость варикапа уменьшается по закону

$$C_U = C_0 [\varphi_k / (\varphi_k + U)]^{1/n}, \quad (1.10)$$

где  $C_U$  — емкость диода;  $C_0$  — емкость диода при нулевом обратном напряжении;  $\varphi_k$  — контактная разность потенциалов;  $n$  — коэффициент, зависящий от типа варикапа ( $n = 2 \div 3$ ). Варикап, предназначенный для умножения частоты сигнала, называют варактором.

К основным параметрам варикапа относят *коэффициент перекрытия по емкости*  $k_C$  — отношение емкостей варикапа при двух крайних значениях обратного напряжения; *добротность*  $Q$  — отношение реактивного сопротивления на заданной частоте сигнала к сопротивлению потерь при заданной емкости или обратном напряжении; *обратный ток варикапа*  $I_{обр}$  — постоянный ток, протекающий через варикап в обратном направлении при заданном обратном напряжении. К параметрам предельного режима относят *максимально допустимое постоянное обратное напряжение*  $U_{обр\ max}$  и *максимально допустимую рассеиваемую мощность*  $P_{max}$ .

**Туннельный диод** имеет ВАХ (рис. 1.6, а), которая содержит участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (отношением приращения напряжения к приращению тока). Это позволяет использовать такой диод в усилителях и генераторах электрических колебаний, а также в импульсных

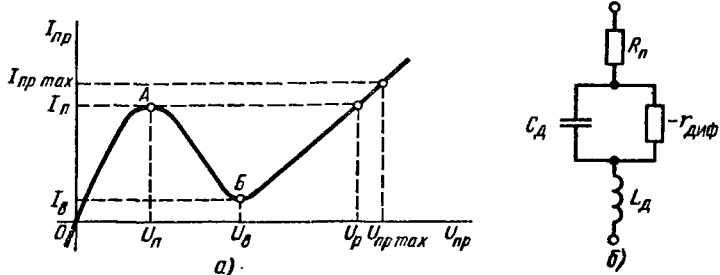


Рис. 1.6

устройствах. Качество диода определяют протяженность и крутизна «падающего» участка ВАХ. Частотные свойства диода, работающего при малых уровнях сигнала на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением, определяются параметрами элементов эквивалентной схемы (рис. 1.6, б). Активная составляющая полного сопротивления имеет отрицательный знак вплоть до частоты

$$f_R = \sqrt{r_{диф}/R_{п} - 1/(2\pi r_{диф} C_{д})}. \quad (1.11)$$

Усиление и генерирование колебаний возможно на частотах, не превышающих  $f_R$ .

Основные параметры туннельного диода следующие: *пиковый ток*  $I_{п}$  — прямой ток в точке максимума ВАХ, при котором  $dI/dU = 0$ ; *ток впадины*  $I_{в}$  — прямой ток в точке минимума его характеристики, при котором  $dI/dU = 0$ ; *отношение токов*  $I_{п}/I_{в}$ ; *напряжение пика*  $U_{п}$  — прямое напряжение, соответствующее току пика; *напряжение впадины*  $U_{в}$  — прямое напряжение, соответствующее току впадины; *напряжение раствора*  $U_{р}$  — прямое напряжение, большее напряжения впадины, при котором ток равен пиковому; *индуктивность*  $L_{д}$  — полная последовательная индуктивность диода при заданных условиях; *удельная емкость*  $C_{д}/I_{п}$  — отношение емкости туннельного диода к пиковому току; *дифференциальное сопротивление*  $r_{диф}$  — величина, обратная крутизне ВАХ; *резонансная частота туннельного диода*  $f_0$  — расчетная частота, при которой общее реактивное сопротивление  $p$ - $n$ -перехода и индуктивности корпуса туннельного диода обращается в нуль; *предельная резистивная частота*  $f_R$  — расчетная частота, при которой активная составляющая полного сопротивления последовательной цепи, состоящей из  $p$ - $n$ -перехода и сопротивления потерь, обращается в нуль; *шумовая постоянная туннельного диода*  $K_{ш}$  — величина, определяющая коэффициент шума диода; *сопротивление по-*

терь туннельного и  $a R_{\pi}$  — суммарное сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов.

К максимально допустимым параметрам относят *максимально допустимый постоянный прямой ток туннельного диода*  $I_{\text{пр max}}$ , *максимально допустимый прямой импульсный ток*  $I_{\text{пр. и max}}$ , *максимально допустимый постоянный обратный ток*  $I_{\text{обр max}}$ , *максимально допустимую мощность СВЧ*  $P_{\text{СВЧ max}}$ , рассеиваемую диодом.

## ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

**1.1.** Имеется сплавной германиевый  $p$ - $n$ -переход с концентрацией  $N_d = 10^3 N_a$ , причем на каждые  $10^8$  атомов германия приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре  $T = 300$  К (концентрации атомов  $N$  и ионизованных атомов  $n_i$  принять равными  $4,4 \cdot 10^{22}$  и  $2,5 \cdot 10^{13}$   $\text{см}^{-3}$  соответственно).

### Решение

Определим концентрацию акцепторных атомов:

$$N_a = N/10^8 = 4,4 \cdot 10^{22}/10^8 = 4,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

( $N = 4,4 \cdot 10^{22}$   $\text{см}^{-3}$  — концентрация атомов германия).

Концентрация атомов доноров  $N_d = 4,4 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$ .

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0,0258 \ln \frac{4,4 \cdot 10^{17} \cdot 4,4 \cdot 10^{14}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} \cong 0,33 \text{ В.}$$

**1.2.** Удельное сопротивление  $p$ -области германиевого  $p$ - $n$ -перехода  $\rho_p = 2$  Ом·см, удельное сопротивление  $n$ -области  $\rho_n = 1$  Ом·см. Вычислить контактную разность потенциалов (высоту потенциального барьера) при  $T = 300$  К, если подвижности электронов и дырок в германии соответственно равны  $\mu_n = 0,39$  и  $\mu_p = 0,19$   $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

### Решение

Известно, что удельное сопротивление  $p$ -области полупроводника

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} \approx \frac{1}{N_a e \mu_p},$$

где  $N_a$  — концентрация акцепторов;  $e$  — заряд электрона;  $\mu_p$  — подвижность дырок. Отсюда

$$N_a = \frac{1}{\rho_p e \mu_p} = \frac{1}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1900} = 1,65 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$