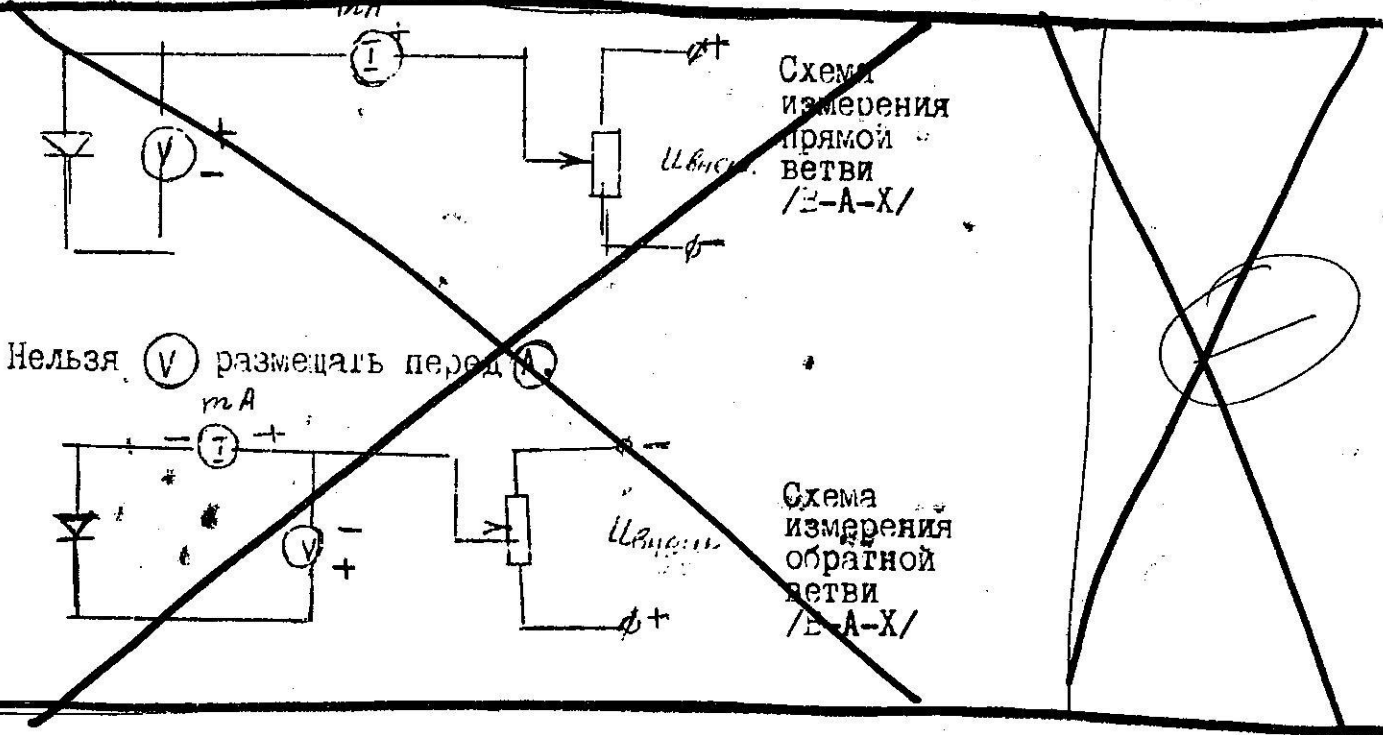



1. Опорные или стабилироны.
2. Тунельные.
3. Обращенные /с перевернутой В-А-Х/.
4. Варикапы./ нелинейная зависимость емкости от напряжения/.



ВАРИКАПЫ

 — варикапы, использ. нелинейные свойства.  $C_{бар}$  при его включении на обратное напряжение.

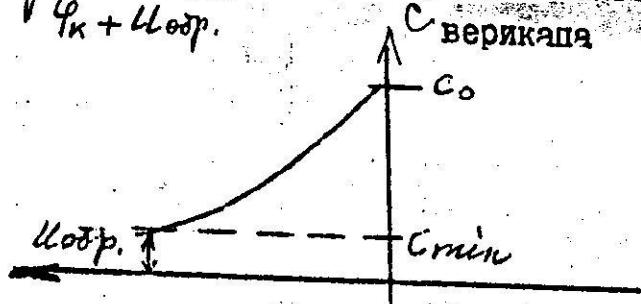
**Общие сведения.** Варикап — это полупроводниковый диод, применяемый в качестве электрического конденсатора, управляемого напряжением. В варикапе используется зависимость емкости перехода от обратного напряжения.

Варикап — и/и диод, на который подается обратное напряжение, определяющее среднее значение его емкости. Диод обладает барьерной и диффузионной емкостями. В качестве варикапов используются только диоды при обратном полярном соединении, когда проявляется только барьерная емкость.

(Идеальная газверная емкость перехода)  
 идеальная емкость Варшана (при  $U_{обр} = 0$ )  
 $\varphi_k$  - контактная разность потенциалов p-и перехода

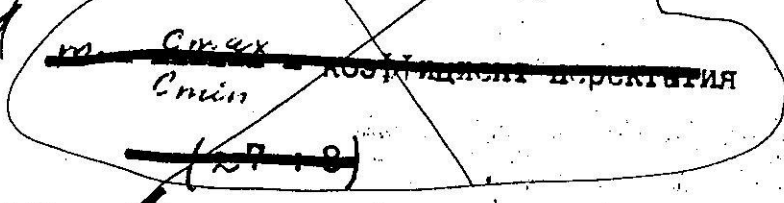
$$C = C_0 \sqrt{\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U_{обр.}}$$

Параметры и характеристики  
 C верикапа



Основные

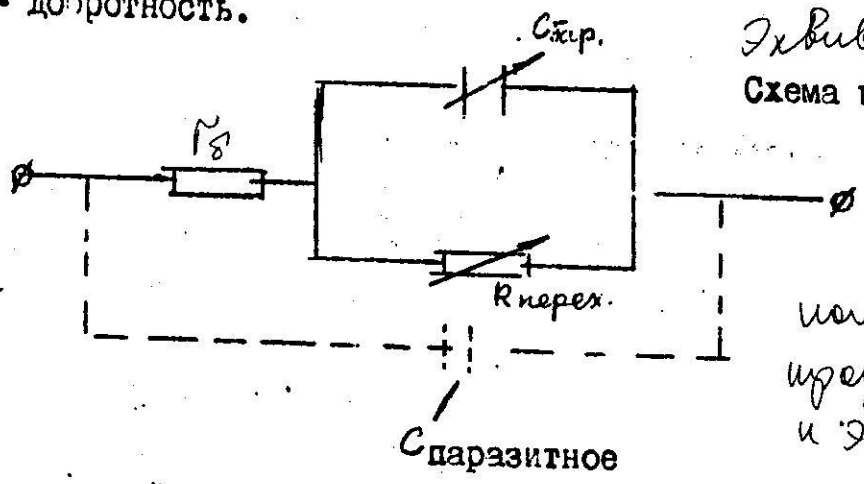
- Параметры:
1.  $C_{ном}$  - емкость при номинальном напряжении смещения
  2.  $U_{max}$  - максимальное напряжение смещения
  3. Добротность



С ростом  $U_{обр}$  увеличивается ширина перехода, как бы раздвигаются обкладки конденсат., на ког. размещается объемный заряд.

$C_{ном}$  - емкость, на которую настраивают, паспортная величина.

Q - добротность.



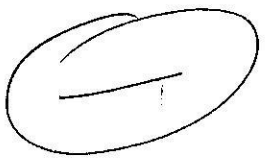
Эквивалентная  
 Схема верикапа

$R_с$  - суммарное сопротивление (выводы, электроды, области базы и эмиттера)

$R_{перех.} \Rightarrow \gamma_{базы} + \gamma_{выводов}$

$C_{обр.} \Rightarrow C_{параз.}$

$R_{перех}$  - суммарное сопротивление в переходе



### Варикапы

**Варикапы** применяют в качестве конденсатора с электрически управляемой емкостью. Их можно использовать, например, для электронной перестройки резонансных систем.

Варикап представляет собой полупроводниковый диод, на который подается обратное напряжение, определяющее среднее значение его емкости. Начальная барьерная емкость перехода  $C_0$  при  $U_{обр}=0$  и последовательное сопротивление потерь  $r$  (рис. 2.33) определяются геометрическими размерами перехода, удельным сопротивлением полупроводника и технологией изготовления диода. Варикапы должны иметь большой диапазон изменения емкости в зависимости от напряжения и малое сопротивление потерь.

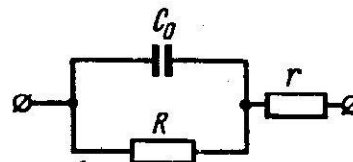


Рис. 2.33. Эквивалентная схема варикапа

Основными параметрами варикапа являются: емкость при номинальном напряжении смещения, максимальное напряжение смещения, добротность, которая на низких частотах определяется как  $Q = \omega C_0 R$ , а на высоких — как отношение реактивного сопротивления к полному сопротивлению потерь на заданной частоте:  $Q = 1/\omega C_0 r$  — коэффициент перекрытия по емкости в рабочем интер-

вале напряжений  $C_{\max}/C_{\min}$  и, наконец, температурный коэффициент емкости ТКС, равный  $1/C_0 \partial C_0 / \partial T$ , характеризующий изменение емкости при изменении температуры.

Варикапы изготавливают в виде точечных диодов или в виде плоскостных диодов с тонкой базой (порядка 20 мкм): низкочастотные варикапы для получения малых обратных токов выполняют из кремния. Для высокочастотных параметрических варикапов используют обычно германий, обладающий большой подвижностью носителей  $\mu_n$  и  $\mu_p$ , что уменьшает  $r$  (или арсенид галлия, у которого  $\mu_n$  еще больше). Эффект изменения емкости в зависимости от напряжения используется и для целей умножения частоты. Принцип действия таких устройств основан на нелинейных свойствах емкости электронно-дырочного перехода. Диоды, работающие на этом принципе, называют варакторами. Варакторами же часто называют и диоды, предназначенные для параметрического усиления сигнала.

**Добротность варикапа** При прохождении через варикап переменного тока  $I_m$  часть мощности поглощается в токоведущих элементах: выводах, электродах, областях базы и эмиттера, обладающих некоторым результирующим сопротивлением потерь  $r_6$ . Поглощение мощности происходит и в самом электронно-дырочном переходе, находящемся под воздействием переменного напряжения  $U_m$ . Сопротивление потерь в переходе обозначим  $R_n$ . Таким образом, приходим к эквивалентной схеме варикапа, показанной на рис. 3.26.

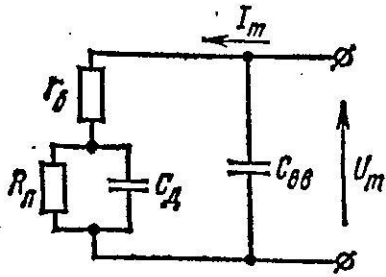


Рис. 3.26

**Добротность варикапа (Q)** называют отношением реактивной мощности  $P_{\text{реакт}} = \frac{1}{2} \omega C_d U_m^2$  к мощности потерь  $P_{\text{пот}}$ :

$$Q = P_{\text{реакт}} / P_{\text{пот}} \quad (3.57)$$

Мощность потерь имеет две составляющие: потери в токоведущих элементах

$$P_r = \frac{1}{2} r_6 I_m^2 = \frac{1}{2} (\omega C_d U_m)^2 r_6;$$

потери в p-n-переходе

$$P_{R_n} = \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{R_n}.$$

Отсюда добротность варикапа

$$Q = \frac{1}{\omega C_d r_6 + \frac{1}{\omega C_d R_n}} \quad (3.58)$$

Как видно из выражения (3.58), добротность варикапа зависит от частоты. **На низких частотах** когда пренебрежимо мал первый член в знаменателе, добротность

$$Q_{\text{нч}} = \omega C_d R_n = \omega C_{\text{бар}} R_{\text{пер}} \quad (3.59)$$

определяется потерями в p-n-переходе.

**На высоких частотах** когда пренебрежимо мал второй член, добротность

$$Q_{\text{вч}} = \frac{1}{\omega C_d r_6} = \frac{1}{\omega C_{\text{бар}} r_6} \quad (3.60)$$

определяется потерями в токоведущих элементах.

**Максимальная добротность** соответствует частоте, при которой производная  $dQ/d\omega = 0$ .

В результате дифференцирования имеем:

$$Q_{\text{опт}} = \frac{1}{2} \left( \frac{R_n}{r_6} \right)^{1/2}, \quad \omega_{\text{опт}} = \frac{1}{C_d (r_6 R_n)^{1/2}} \quad (3.61)$$

Поскольку предпочтительна более высокая добротность, отсюда следует, что варикап должен иметь максимальную величину отношения  $R_n/r_6$ . Для повышения  $R_n$  используют полупроводники с широкой запрещенной зоной (AsGa), имеющие низкую концентрацию неосновных носителей заряда, т. е. малый обратный ток. Для уменьшения  $r_6$  повышают концентрацию примесей в базе в области, не захватываемой p-n-переходом, т. е. на участке от электрода до p-n-перехода. Практически добротность варикапов может быть получена не хуже 100.

Рабочий диапазон частот варикапа определяется значениями минимально допустимой добротности  $Q_{\text{min}}$ . Минимальная рабочая частота варикапа

$$\omega_{\text{min}} = \frac{1}{Q_{\text{min}} C_d R_n} \quad (3.62)$$

а максимальная рабочая частота

$$\omega_{\text{max}} = \frac{1}{Q_{\text{min}} C_d r_6} \quad (3.63)$$

и на стр. 64

$$P = \bar{U} \cdot \bar{I} =$$

$$= \frac{U^2}{R}$$

$$R = \frac{1}{\omega C}$$

$$\bar{U} = \frac{U}{\sqrt{2}}$$

$$P = \frac{1}{2} U^2 \omega C$$



~~$$Q_{\text{перех. ч.}} = \frac{\omega C_{\text{бар.}}}{R_{\text{перех.}}}$$

$$Q_{\text{высок. ч.}} = \frac{1}{\omega R_{\Sigma} (C_{\text{бар.}} + i C_{\text{вк.}})}$$

$$X_{\Sigma} = \frac{1}{\omega C_{\text{бар.}}}$$

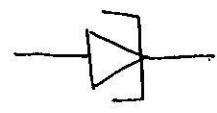
$$X_{\Sigma} = 0$$~~

Требование к Q для варикапов очень высоко. Варикапы используются для настройки генераторов, применяемых в параметрических усилителях.

**Применение варикапов.** Благодаря возможности изменения емкости с помощью напряжения варикапы находят применение для настройки высокочастотных колебательных контуров и управления частотой генераторов гармонических колебаний. Промышленностью выпускается для этой цели большой ассортимент варикапов. Существует также **разновидность варикапов**, специально предназначенных для параметрического усиления колебаний и преобразования несущей частоты. Эти приборы называют **варакторами** или **параметрическими диодами**.

**ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ**

промышленный полупроводник  $\sim 10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$



В 1958 г. японским ученым **Есаки** были обнаружены **p-n-структуры**, имеющие очень большую концентрацию примесей (порядка  $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ), обладают аномальными характеристиками, показанными на рис 3.27. В отличие от обычных диодов они хорошо проводят ток не только в прямом, но и в обратном направлении, а на прямой ветви их характеристики существует падающий участок. Аномальный ход характеристик сильно легированных p-n-структур обусловливается, как было установлено, **туннельным эффектом**, поэтому диоды подобного типа получили название **туннельных**.

Как известно из курса физики, частица, имеющая энергию, недостаточную для прохождения через потенциальный барьер, может все же пройти сквозь него, если с другой стороны этого барьера имеется такой же свободный энергетический уровень, какой занимала частица перед барьером. Это явление называется туннельным эффектом.

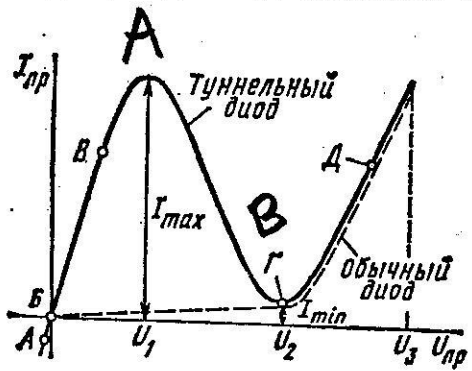


Рис. 3.27

В квантовой механике показывается, что вероятность туннельного перехода тем выше, чем уже потенциальный барьер и чем меньше его высота. Туннельный переход совершается электронами без затрат энергии.

В обычных диодах, имеющих концентрацию примеси в менее легированной области не выше  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , толщина электронно-дырочного перехода сравнительно велика и вероятность туннельного перехода электронов через потенциальный барьер ничтожно мала. В туннельных диодах благодаря высокой концентрации примесей [см. формулу (2.40)] толщина перехода составляет около 0,01 мкм, т. е. барьер является очень узким. В этих условиях вероятность туннельного перехода электронов через потенциальный барьер оказывается значительной, что и приводит к своеобразному виду характеристики диода.

Для того чтобы уяснить, каким образом влияет туннельный эффект на характеристики туннельного диода, рассмотрим энергетическую диаграмму сильно легированной p-n-структуры при различных значениях приложенного к ней напряжения. Вследствие высокой концентрации примесей локальные уровни в такой структуре образуют сплошную зону, а уровень Ферми смещается в зону проводимости в n-области и в валентную зону в p-области. Полупроводники такого типа называют вырожденными.

На рис. 3.28, б показана энергетическая диаграмма туннельного диода при нулевом смещении, штриховкой показаны энергетические уровни, заполненные электронами. В этом случае электроны могут совершать туннельные переходы в обоих направлениях; в состоянии равновесия результирующий ток равен нулю.

Если на туннельный диод подано обратное напряжение, то энергетические зоны смещаются таким образом, что напротив заполненных уровней валентной зоны p-области оказываются свободные уровни зоны проводимости n-области (рис. 3.28, а). При этом будет преобладать поток электронов, совершающих туннельный переход из валентной зоны p-области в зону проводимости n-области, что приводит к резкому увеличению обратного тока диода. Напомним, что в обычных диодах обратный ток невелик, так как он создается главным образом за счет экстракции неосновных носителей заряда, имеющих малую концентрацию. Этот режим соответствует участку А характеристики диода (см. рис. 3.27).



сир. 67-3



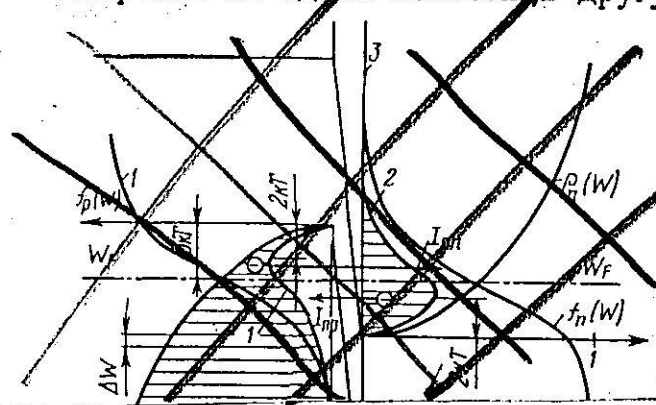
см \*

+

= F

~~обычного диодного (диффузионного и дрейфового) от приложения  
го напряжения~~

Для выяснения физических процессов, протекающих в туннельном диоде, необходимо рассмотреть зонные диаграммы для различных напряжений, приложенных к диоду. Туннельный переход электронов из одной области в другую возможен, если энергетическим уровням, заполненным электронами в одной области, соответствовали бы свободные от электронов уровни («вакансии») в другой области, расположенные на той же энергетической высоте, поскольку электрон совершает туннельный переход без изменения своей энергии.



Для упрощения построения зонных диаграмм в дальнейшем будем предполагать, что в зоне проводимости *n*-области все энергетические уровни от дна зоны до уровня Ферми целиком заполнены электронами, а все уровни, выше уровня Ферми, целиком свободны (нег штриховки). В валентной зоне *p*-области все энергетические уровни от потолка зоны до уровня Ферми будем считать целиком свободными от электронов, в то время как все уровни, лежащие ниже уровня Ферми, — целиком заполненными. Подобная идеализация вполне допустима при рассмотрении принципа действия туннельного диода.

При указанном допущении в случае  $U=0$  (рис. 2.36а) ток через диод протекать не будет, так как свободным уровням в одной области соответствуют на той же высоте свободные уровни в дру-

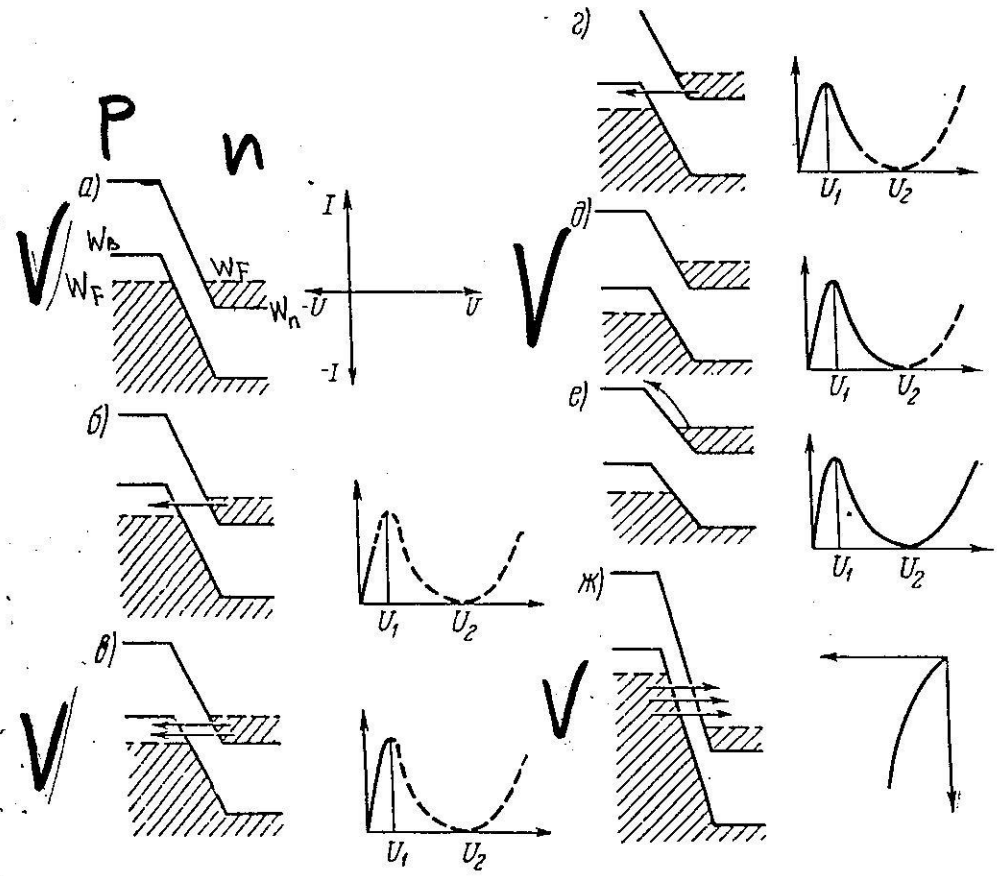


Рис. 2.36. Идеализированные энергетические диаграммы туннельного диода:  
 а)  $U=0$ ; б)  $0 < U < U_1$ ; в)  $U=U_1$ ; г)  $U_1 < U < U_2$ ; д)  $U=U_2$ ;  
 е)  $U > U_2$ ; ж)  $U < 0$

буд  
гет  
ны  
бод  
чес  
цел  
леж  
иде  
вия  
рез  
обл

ль-  
из-  
од-  
ти-  
н-  
ой  
бы  
ов  
у-  
ые  
ой  
он  
е-  
ей  
на  
ь-  
не  
су-  
от  
лю  
У),  
а).  
и  
ой  
ен  
го-  
от  
ны  
е-  
т-  
гн-  
эх  
эт,  
об-  
ям  
но  
ль-  
сп-

той области; равным образом, заполненным уровням в одной области, соответствуют заполненные уровни и в другой области.

На рис. 2.36б приведена диаграмма для случая прямого напряжения  $0 < U < U_1$ . Здесь уровень Ферми в *n*-области выше, чем в *p*-области, и поток электронов переходит из *n*-области в *p*-область. Величина этого прямого тока определяется степенью перекрытия свободных уровней в валентной зоне и заполненных уровней в зоне проводимости. С увеличением прямого напряжения это перекрытие расширяется и при  $U = U_1$  (рис. 2.36в), когда уровень потолка валентной зоны *p*-области совпадает с уровнем Ферми в зоне проводимости *n*-области, достигает максимального значения; туннельный ток  $I = I_1$  также становится максимальным. Пиковый ток  $I_1$  (рис. 2.34а) пропорционален площади перехода и вероятности туннельного эффекта. Напряжение  $U_1$ , соответствующее пиковому значению тока, зависит от степени легирования обеих областей.

При дальнейшем росте прямого напряжения  $U > U_1$  туннельный ток начинает убывать, так как из-за подъема уровня Ферми в *n*-области перекрытие уровней сокращается и уменьшается число переходов электронов в *p*-область. Наконец, потолок валентной зоны совпадает с дном зоны проводимости (рис. 2.36д), перекрытие зон прекращается, и туннельный ток становится равным нулю при напряжении  $U = U_2$ . При этом напряжении появляется обычный диффузионный ток инжекции через *p-n*-переход, когда дырки с большими энергиями начинают переходить через энергетический барьер из валентной зоны *p*-области в валентную же зону *n*-области, а во встречном направлении из *n*-области в *p*-область инжектируются электроны в зоне проводимости. Однако вблизи минимума тока  $I_2$  (рис. 2.34а) и несколько правее в диоде основную роль играет избыточный ток, вызываемый переходом электронов из зоны проводимости *n*-области на свободные ловушечные уровни в средней части запрещенной зоны, а оттуда на свободные энергетические

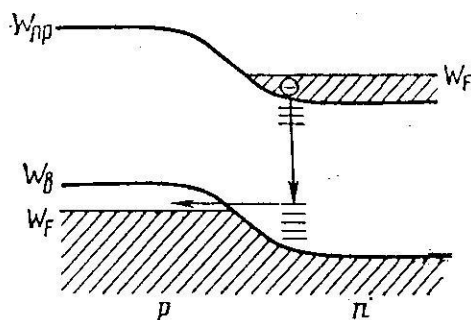


Рис. 2.37. Схема образования избыточного тока

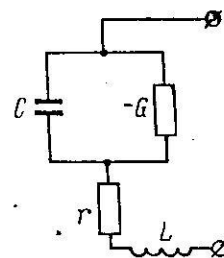


Рис. 2.38. Эквивалентная схема туннельного диода

уровни валентной зоны *p*-области (рис. 2.37). Избыточный ток уменьшает отношение  $I_1/I_2$  в туннельном диоде.

При обратном напряжении  $U < 0$  (рис. 2.36) уровень Ферми в *n*-области ниже, чем в *p*-области на величину, определяемую при-



Сколько  $U_{max}$  в точке максимума (от 70  
нескольких до нескольких)

ложенным напряжением. Энергетические зоны раздвигаются, и появляется возможность перехода электронов с заполненных уровней валентной зоны  $p$ -области на свободные уровни зоны проводимости  $n$ -области. Через диод потечет большой обратный ток в направлении от  $n$ -области к  $p$ -области.

Туннельный диод характеризуется следующими основными параметрами (рис. 2.34а):

- отношением токов в максимуме и в минимуме вольтамперной характеристики  $I_1/I_2$ ;
- отрицательной дифференциальной проводимостью на участке  $AB$  в точке максимума производной;
- напряжением переключения  $\Delta U_n = U_3 - U_1$ , которое определяет возможный скачок напряжения на нагрузке при работе туннельного диода в схеме переключения;
- барьерной емкостью  $C(U_2)$  диода, которая обычно измеряется при минимуме тока. Емкость в максимуме тока равна  $C(U_1) \approx 0,8C(U_2)$ .

AB

Эквивалентная схема туннельного диода, соответствующая рабочему участку  $AB$  с отрицательной проводимостью, представлена на рис. 2.38. Для других участков вольтамперной характеристики схема остается такой же, но дифференциальная проводимость перехода становится положительной. Помимо емкости  $C$  и дифференциальной проводимости перехода  $G$ , в схему входят последовательное сопротивление потерь  $r$ , включающее сопротивление  $p$ - и  $n$ -областей, контактов и подводящих проводов, и индуктивность  $L$  выводов, корпуса и кристалла.

Емкость перехода при толщине последнего порядка  $10^{-2}$  мкм составляет  $C = 30 \div 50$  пФ. Так как от величины емкости зависят частотные свойства туннельного диода, ее стремятся сделать минимальной. Величина отрицательной дифференциальной проводимости  $G$  определяется углом наклона падающего участка вольтамперной характеристики; обычно она находится в пределах от единицы до сотых долей сименса. Индуктивность  $L$  (порядка  $10^{-10}$  Г) является паразитным параметром, так как ограничивает собственную резонансную частоту  $\omega_0$ . Для уменьшения  $L$  контакты осуществляют мембраной, прижимом массивного электрода и т. п. Величина  $r$  измеряется десятими долями ом и единицами ом. Полное сопротивление схемы при данной частоте  $\omega$

$$Z = r + \frac{-R}{1 + \omega^2 C^2 R^2} + i\omega \left( L - \frac{CR^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \right)$$

где  $R = 1/G$ .

Приравнивая нулю действительную часть полного сопротивления, находим предельную частоту, на которой туннельный диод способен генерировать колебания:

$$f_{пред} = \frac{1}{2\pi RC} \sqrt{\frac{R}{r} - 1}$$

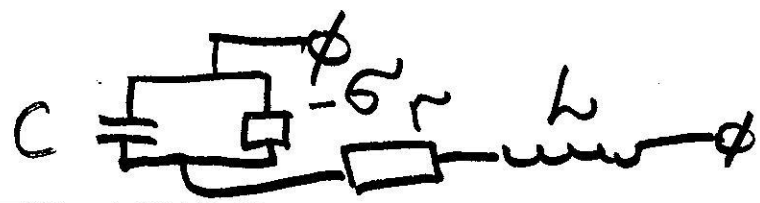


рис. 2.38



Максимальное значение предельной частоты  $f_{\text{макс}} = 1/4\pi rC$  получается при  $R=2r$ . Следовательно, частотные свойства туннельного диода определяются постоянной времени  $rC$ .

Уменьшать емкость  $C$  путем уменьшения площади перехода нецелесообразно, так как при этом уменьшается и пиковый ток  $I_1$ , что увеличит отрицательное сопротивление, и, следовательно, предельная частота останется без изменения. Таким образом, при уменьшении  $C$  ток  $I_1$  должен оставаться неизменным, поэтому качество туннельного диода удобно характеризовать отношением  $I_1/C$ . В настоящее время туннельные диоды изготавливают из германия, кремния, арсенида галлия и других полупроводниковых соединений. Наиболее перспективным материалом является арсенид галлия, обладающий наилучшими параметрами. На рис. 2.39 приведены для сравнения вольтамперные характеристики туннельных диодов из различных полупроводниковых материалов. Из рисунка видно, что диоды из арсенида галлия обладают наибольшим отношением  $I_1/I_2$  и напряжением переключения  $\Delta U_{\text{п}}$ .

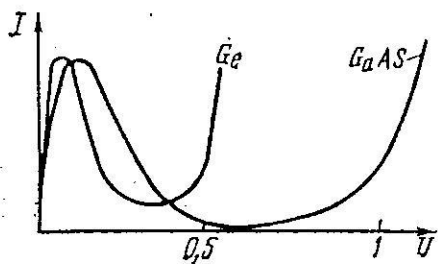


Рис. 2.39. Вольтамперные характеристики германиевых и арсенидгаллиевых туннельных диодов

Основными достоинствами туннельного диода являются:

- высокие рабочие частоты — до 40 ГГц и весьма малое время переключения, которые определяют преимущественно конструктивными особенностями, а не временем прохождения электронами  $p-n$ -перехода, составляющим около  $10^{-13}$  с;
- высокая температуростойкость; у арсенид-галлиевых туннельных диодов рабочая температура достигает  $400^\circ\text{C}$ . Возможность работы туннельных диодов при более высоких температурах по сравнению с обычными диодами объясняется тем, что в них используется вырожденный полупроводник с большой концентрацией примесей. При большой концентрации примесей концентрация электронов велика и влияние собственной электропроводности сказывается при более высоких температурах;
- низкий уровень шума;
- большая плотность тока, свойственная туннельному эффекту, достигающая  $10^3 \div 10^4$  А/см<sup>2</sup>.

Как недостаток, следует отметить малую мощность туннельных диодов из-за низких рабочих напряжений и малых площадей перехода.

В связи с тем что ток в туннельном диоде создается основными носителями, прохождение которых не связано с накоплением неравновесного заряда, прибор обладает чрезвычайно малой инерционностью. Предельная частота туннельного диода ограничивается лишь емкостью перехода, распределенным сопротивлением базы и индуктивностью выводов и может достигать сотен гигагерц. Отличительными особенностями туннельного диода являются также малое потребление мощности, устойчивость к радиационному излучению, малые габариты и масса. Влияние температуры на характеристику диода сравнительно невели-

ко (рис. 3.20). Эти качества туннельного диода обусловили его применение в радиоэлектронике. Однако существенным недостатком устройств на туннельных диодах является сильная электрическая связь между выходом и входом, что затрудняет во многих случаях использование туннельных диодов.

Вероятность туннельного перехода основных носителей увеличивается, увеличивается количество переходов в единицу времени, растет туннельный ток.

Свойство туннельного диода - быстроедействие, т.к. при переключении осуществляется движение основных носителей, отсутствует рассеивание избыточного количества неосновных носителей.

**ОБРАЩЕННЫЙ ДИОД**



Понижает концентрацию примесей до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , /уровни Ферми совпадают с дном или потолком соответствующей зоны/. Туннельный эффект на прямой ветви стремится к 0, на обратной ветви повышается по мере роста  $I_{обр}$ .

Используется при выпрямлении малых сигналов с амплитудой напряжения  $U \approx 0,1$  вольт. Работают на очень высоких частотах.

Диод оказывает малое сопротивление проходящему току при обратном включении и сравнительно большое сопротивление при прямом включении.

$I_{обр}$

$I_{пр}$

$I_{обр}$

Принцип действия обращенного диода также основан на туннельном перемещении электронов сквозь энергетический барьер. Концентрация примесей в его  $p$ - и  $n$ -областях подбирают такой, чтобы при отсутствии внешнего напряжения дно зоны проводимости  $n$ -области и потолок валентной зоны  $p$ -области совпадали бы в зонной диаграмме по высоте, т. е. полупроводниковые области находились бы на грани вырождения. В этом случае при приложении прямого напряжения, когда дно зоны проводимости  $n$ -области поднимается выше  $p$ -области, туннельный ток отсутствует и прямая ветвь вольтамперной характеристики обращенного диода подобна участку характеристики обычного диода, на котором прямой ток определяется инжекцией носителей через  $p$ - $n$ -переход. Если же к обращенному диоду приложить обратное напряжение и сместить дно зоны проводимости  $n$ -области на диаграмме вниз так, чтобы зоны перекрывались, то появится значительный обратный туннельный ток, созданный перемещением электронов сквозь барьер из  $p$ -области в  $n$ -область.

На рис. 2.40а приведена зонная диаграмма обращенного диода для случая обратного напряжения (заштрихованные области пол-

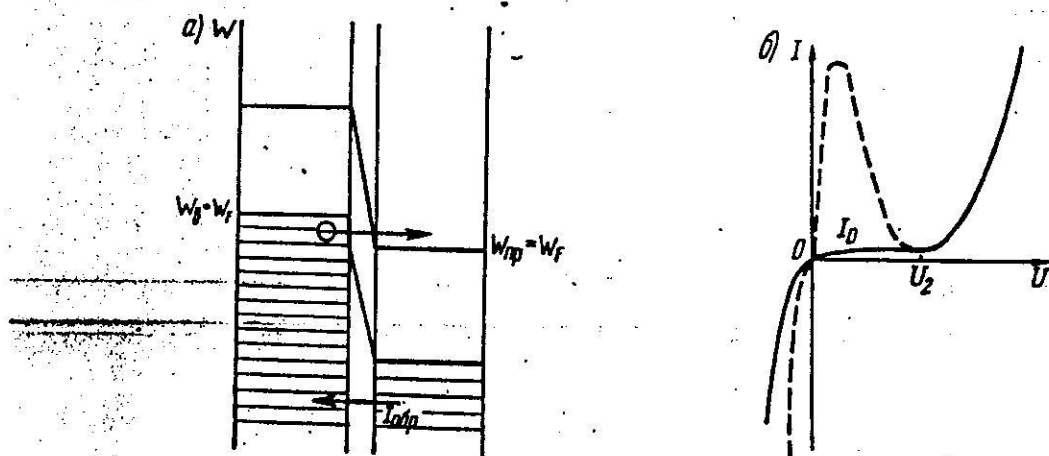


Рис. 2.40. К пояснению работы обращенного диода:  
а) зонная диаграмма; б) вольтамперная характеристика.

ностью заняты электронами), а на рис. 2.40б — его вольтамперная характеристика. При работе обращенного диода его ветвь обратного тока используется как «проводящий» участок, и соответственно прямой ток при напряжениях  $0 < U < U_2$  принимается за обратный. Отсюда и название — обращенный диод. Для сравнения на том же рисунке пунктирной линией показана характеристика туннельного диода. Параметры обращенных диодов те же, что и туннельных. Специфическим параметром обращенного диода является крутизна обратной ветви характеристики.

Таким образом, обращенные диоды обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) — прямому включению.

Из принципа действия обращенных диодов ясно, что они во-первых, способны работать на очень малых сигналах. Во-вторых, должны обладать хорошими частотными свойствами, так как тунелирование — процесс малоинерционный, а эффекта накопления неосновных носителей при малых прямых напряжениях практически нет. Поэтому обращенные диоды можно использовать на СВЧ. В-третьих, из-за относительно большой концентрации примесей в прилегающих к p-n-переходу областях обращенные диоды оказываются мало чувствительными к воздействиям проникающей радиации.

Вольт-амперная характеристика полупроводникового стабилитрона показана на рис. 3.21. В точке А, где пробой является достаточно устойчивым, ток обычно имеет величину порядка 50—100 мкА. После точки А ток резко возрастает и допустимая величина его  $I_{\max}$  ограничивается лишь мощностью рассеяния  $P_{\max}$ :

$$I_{\max} = P_{\max} / U_{\text{ст}}$$

Допустимая рассеиваемая мощность  $P_{\max}$  определяется тепловым сопротивлением диода  $R_T$ , допустимой температурой перехода  $T_{\text{п max}}$  и температурой окружающей среды  $T_0$  в соответствии с соотношением (3.21):

$$P_{\max} = \frac{T_{\text{п max}} - T_0}{R_T} \quad (3.48)$$

В современных стабилитронах максимальный ток колеблется в пределах от нескольких десятков миллиампер до нескольких ампер. Превышение максимального тока приводит к выходу диода из строя.

Рабочее напряжение стабилитрона, являющееся напряжением пробоя  $p$ - $n$ -перехода, зависит от концентрации примесей в  $p$ - $n$ -структуре и лежит в пределах 4—200 В.

Напряжение стабилитрона в рабочем режиме мало зависит от тока, что является основой применения этих приборов. На рабочем участке характеристики (от  $I_{\min}$  до  $I_{\max}$ ) зависимость напряжения от тока

характеризует дифференциальное сопротивление стабилитрона (см. рис. 3.21):

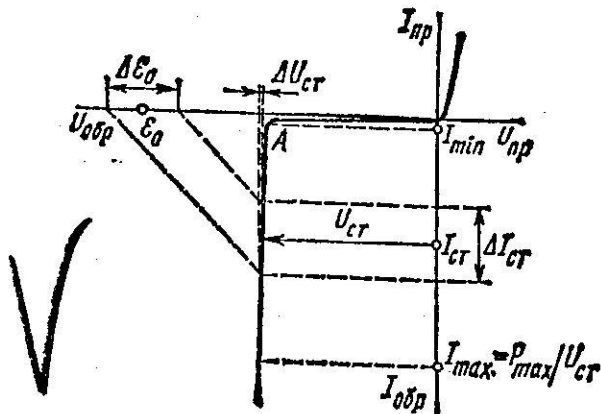


Рис. 3.21

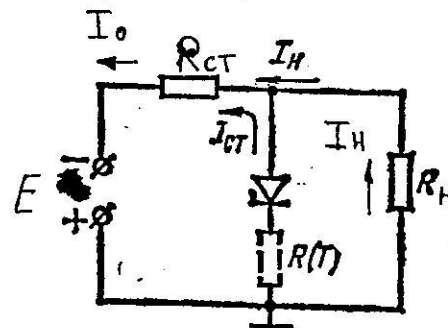


Рис. 3.22

$$R_d = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}}$$

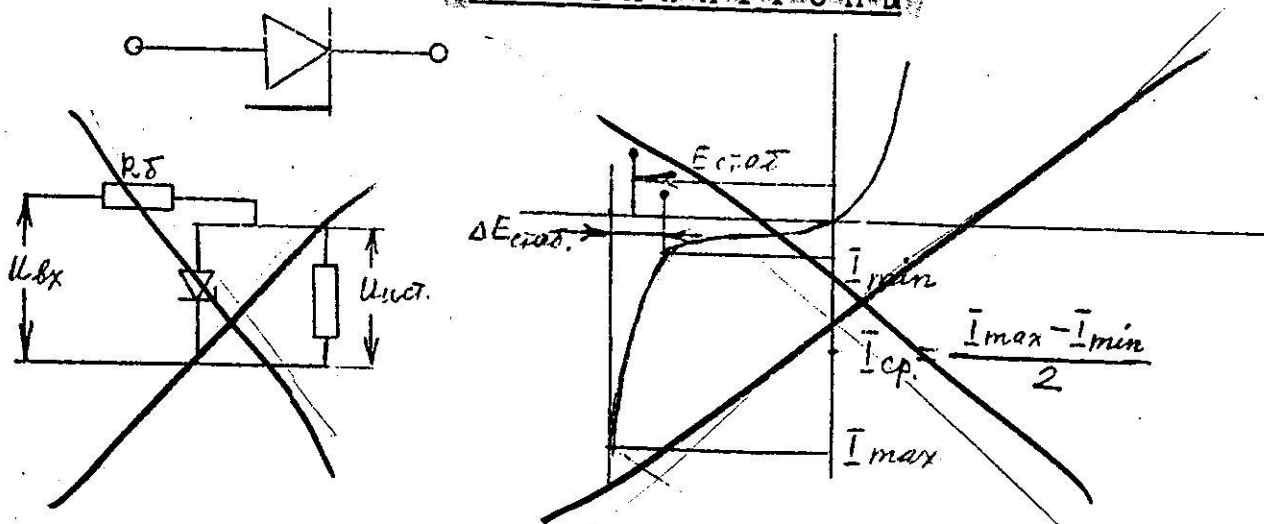
Оно составляет несколько десятков и даже единиц ом, причем меньшая величина соответствует стабилитронам, имеющим рабочее напряжение 7—15 В и большой рабочий ток.

При использовании стабилитрона для стабилизации напряжения его включают параллельно нагрузке  $R_H$  (рис. 3.22). В неразветвленную часть цепи последовательно со стабилитроном включают ограничительный резистор  $R_{\text{ст}}$ , сопротивление которого должно быть значительно больше дифференциального сопротивления стабилитрона  $R_d$  (чем больше отношение  $R_{\text{ст}}/R_d$ , тем лучше стабилизация напряжения).

Резистор  $R_{\text{ст}}$  является принципиальным элементом схемы. Без него схема не может выполнять функции стабилизатора. При изменении величины тока, протекающего через резистор, падение напряжения на нем меняется так, что выходное напряжение оказывается стабилизированным. Причиной изменения тока, как уже указывалось, может быть как изменение напряжения источника питания, так и изменение сопротивления нагрузочного резистора.



## СТАБИЛИТРОНЫ



**Назначение стабилизатора** — стабилизировать напряжение на присоединенной параллельно ему нагрузке в случае изменения ее сопротивления или напряжения источника питания. Полу-

проводниковый стабилизатор представляет собой плоскостной диод, выполненный из сильно легированного кремния. Для работы стабилизатора используется участок пробоя на обратной ветви вольт-амперной характеристики, в пределах которого весьма малые изменения обратного напряжения вызывают резкие изменения обратного тока.

В случае большой концентрации примесей переход получается гонким и в нем возникает электрическое поле большой напряженности, которое вызывает туннельный пробой. При меньшей концентрации примесей и соответственно при большей толщине перехода характер пробоя меняется на лавинный. Величина напряжения пробоя непосредственно связана с удельным сопротивлением материала. Чем выше степень легирования, тем меньше пробивное напряжение. Стабилизаторы на низкие напряжения стабилизации изготовляют из низкоомного материала, а высоковольтные — из высокоомного материала. В высоковольтных стабилизаторах переход имеет значительную ширину и лавинный пробой в них начинается раньше, чем напряженность поля достигнет величины, необходимой для пробоя по туннельному механизму. В широком диапазоне напряжений (от 8 до 200 В) пробой в стабилизаторах является лавинным. В области от 6 до 8 В пробой определяется действием как лавинного, так и туннельного механизмов. При напряжениях ниже 6 В можно считать, что лавинный механизм пробоя уже не действует и существует только туннельный пробой.



76

—

\* Математическое обоснование принципа стабилизации.

Если напряжение питания во время работы может изменяться самопроизвольно в обе стороны относительно некоторого значения  $\mathcal{E}_0$ , то рабочую точку на характеристике стабилитрона выбирают посередине рабочего участка, т. е. берут ток стабилитрона в исходной точке:

$$I_{ст} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}.$$

Для этого напряжение питания должно быть равно

$$\mathcal{E}_0 = U_{ст} + r(I_n + I_{ст}). \quad (3.49)$$

Принцип стабилизации напряжения заключается в следующем. Пусть напряжение питания вследствие неустойчивости изменится в пределах  $\Delta \mathcal{E}$ . Тогда напряжение на стабилитроне и нагрузке будет изменяться на величину  $\Delta U_{ст}$ , которая, как видно из рис. 3.21, значительно меньше  $\Delta \mathcal{E}_0$ . Из выражения (3.49) находим

$$\Delta \mathcal{E}_0 = \Delta U_{ст} + r(\Delta I_R + \Delta I_{ст}) = \Delta U_{ст} + r \left( \frac{\Delta U_{ст}}{R} + \frac{\Delta U_{ст}}{R_i} \right).$$

Отсюда

$$\Delta U_{ст} = \frac{\Delta \mathcal{E}_0}{1 + r/R + r/R_i}. \quad (3.50)$$

При  $r/R_i \gg 1$  получаем, что  $\Delta U_{ст} \ll \Delta \mathcal{E}_0$ , т. е. напряжение на выходе изменяется значительно меньше, чем напряжение на входе стабилитрона.

Стабилизация напряжения имеет место и при изменении сопротивления нагрузки. Пусть по этой причине ток нагрузки возрос на  $\Delta I_n$ . Тогда напряжение на стабилитроне должно снизиться на  $r\Delta I_n$ . Однако этого не происходит, так как сразу же резко уменьшается ток стабилитрона и результирующее изменение тока в неразветвленной цепи будет меньше изменения тока нагрузки:

$$\Delta I_o = \Delta I_n - \Delta I_{ст}.$$

При этом результирующее изменение напряжения нагрузки

$$\Delta U_{ст} = r(\Delta I_n - \Delta I_{ст}) \quad (3.51)$$

получается меньше, чем при отсутствии стабилитрона.

Так как  $\Delta I_{ст} = \Delta U_{ст}/R_i$ , то, подставив выражение (3.51), найдем

$$\Delta U_{ст} = \frac{r\Delta I_n}{1 + r/R_i}. \quad (3.52)$$

Отсюда можно видеть, что стабилизация тем выше, чем больше отношение  $r/R_i$ . Однако чрезмерное увеличение сопротивления сопряжено с большой потерей мощности в нем и поэтому является невыгодным.

$$\left( r \equiv R_{ст} \quad R_i \equiv R \quad \mathcal{E}_0 \equiv E \right)$$

Принцип действия описанного устройства следующий. Допустим, что сопротивление нагрузки уменьшилось, в результате чего ток нагрузки, а следовательно, и падение напряжения на стабилизирующем резисторе увеличились. Это вызовет уменьшение падения напряжения на стабилитроне и тока через него. Таким образом, увеличение тока через нагрузочный резистор приводит к уменьшению тока через стабилитрон. Это, в свою очередь, позволяет сохранить приблизительно неизменным напряжение на нагрузке, несмотря на изменение сопротивления нагрузочного резистора. Иными словами, изменение тока через стабилитрон равно по величине, но противоположно по знаку изменению тока в нагрузке. Аналогичные процессы протекают в схеме и при изменении питающего напряжения.

Для схемы рис. ~~2.31~~ уравнение Кирхгофа можно записать в виде

$$E = I_0 R_{ст} + I_n R_n = I_0 R_{ст} + U_{ст};$$

при  $U_{ст} = 0$   $I_0 = E/R_{ст}$ ; при  $I_{ст} = 0$   $U_{ст} = I_n R_n = E - I_n R_{ст}$ .

После преобразований получаем

$$U_{ст} = \frac{E}{1 + R_{ст}/R_n}$$

На основе полученных выражений строим на графике с характеристикой стабилитрона (рис. 2.32) нагрузочную прямую. На том же графике отложена кривая максимальных значений обратного тока для заданной максимально рассеиваемой мощности  $P_{макс}$ .

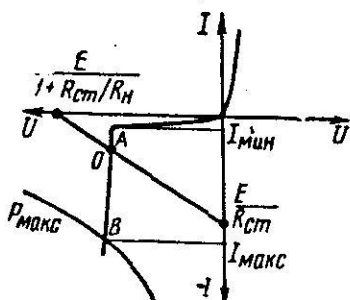


Рис. 2.32. К построению нагрузочной характеристики стабилитрона

Точка  $O$  пересечения нагрузочной прямой с характеристикой является рабочей точкой для заданных значений напряжений источника питания  $E$  и сопротивления нагрузки  $R_n$ . При изменении  $E$  нагрузочная прямая перемещается параллельно самой себе, а при изменении  $R_n$  изменяется ее наклон. Если рабочая точка располагается в пределах участка  $AB$ , напряжение на нагрузке стабилизировано и стабилитрон работает в безопасном режиме.

Параметрами стабилитронов являются: напряжение стабилизации  $U_{ст}$ ; дифференциальное сопротивление в рабочей точке  $R_d = \Delta U / \Delta I$ , характеризующее степень стабилизации; статическое сопротивление в рабочей точке  $R_c = U / I$ ; коэффициент качества  $Q = R_d / R_c$  и температурный коэффициент напряжения стабилизации ТКН, равный отношению относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды; ТКН определяется в процентах на  $1^\circ\text{C}$ .

$$\text{ТКН} = \frac{1}{U_{ст}} \frac{\Delta U}{\Delta T}$$

Конструкция стабилитронов аналогична конструкции выпрямительных диодов.