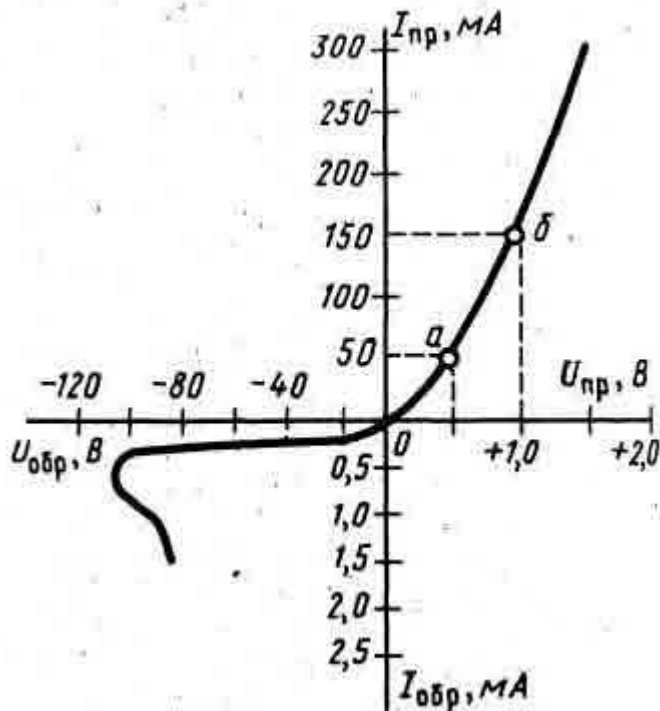


Полупроводниковые диоды

Полупроводниковые диоды – приборы с одним $p-n$ -переходом и двумя выводами, обладающие односторонней проводимостью тока.

Вольт-амперная характеристика диода

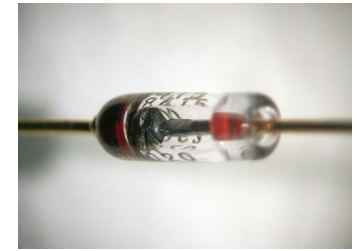
ВАХ диода - ВАХ $p-n$ -перехода. ВАХ (см. рис.) имеет прямую и обратную ветви.



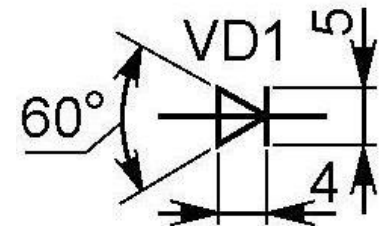
Ток и напряжение диод однозначно связаны вольт-амперной характеристикой.

Нелинейность в начале прямой ветви обусловлена уменьшением сопротивления запирающего слоя с ростом $U_{пр}$. Начиная с некоторого значения $U_{пр}$, х-ка становится почти линейной, т.к. запирающий слой исчезает. На линейном участке сопротивление диода обусловлено почти постоянным сопротивлением p - и n -областей. Небольшая нелинейность возникает из-за изменения сопротивления этих областей вследствие нагрева.

Обратную ветвь ВАХ показывают в другом масштабе, поэтому наблюдается излом х-ки в начале координат. При увеличении $U_{обр}$ обратный ток быстро возрастает, что связано со снижением диффузионного тока при повышении потенциального барьера.



Внешний вид диодов различного назначения



УГО диода.

Стрелка показывает направление прямого тока.

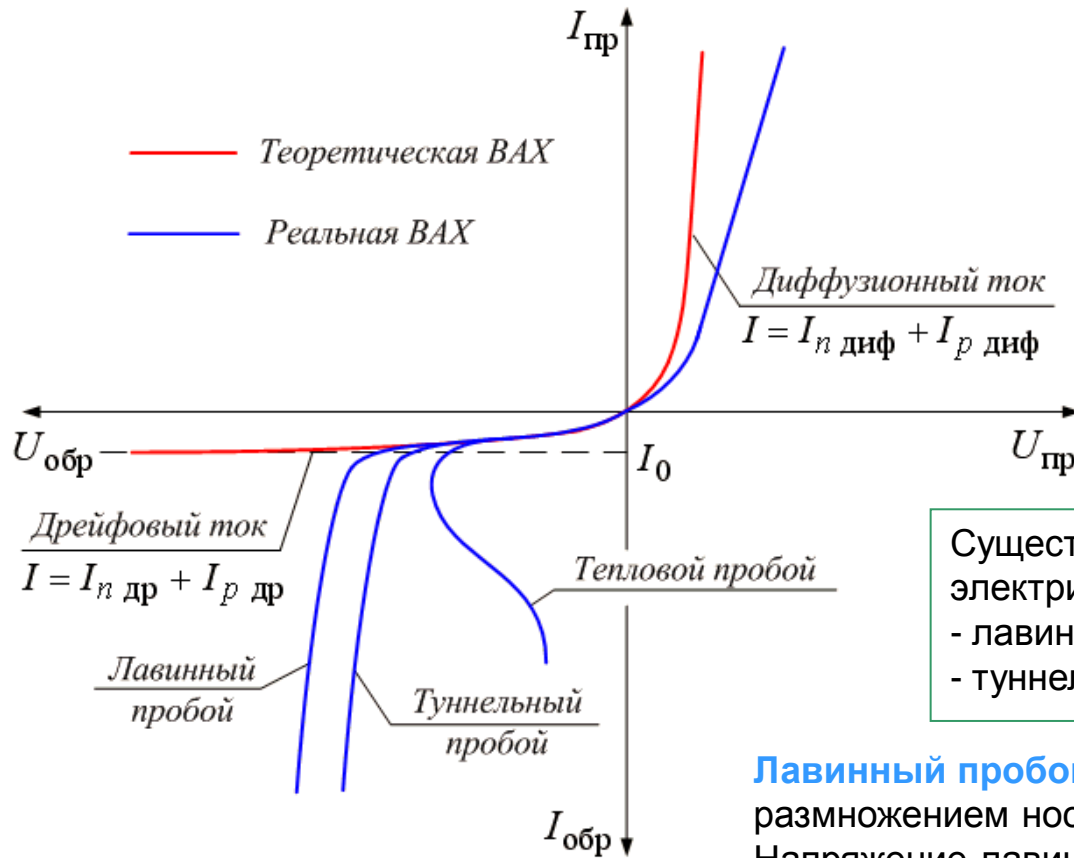


Types of Diode

Типы диодов



Пробой p-n-перехода

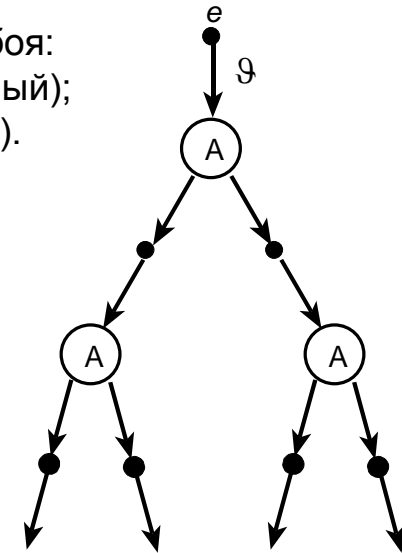


При некотором значении обратного напряжения ($U_{\text{проб}}$) наступает пробой p-n-перехода, при котором обратный ток резко возрастает и сопротивление запирающего слоя уменьшается.

Различают два вида пробоя:
 - электрический (обратимый);
 - тепловой (необратимый).

Существует два вида электрического пробоя:
 - лавинный;
 - туннельный.

Лавинный пробой обусловлен лавинным размножением носителей заряда. Напряжение лавинного пробоя составляет десятки ÷ сотни вольт.



Механизм лавинного пробоя

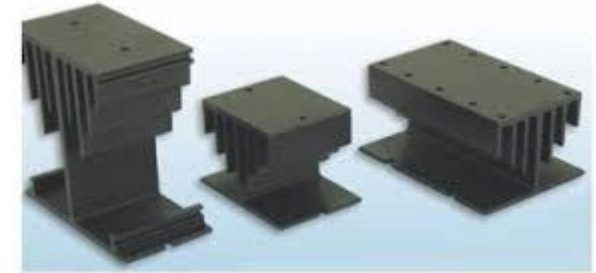
Туннельный пробой объясняется явлением **туннельного эффекта**, который заключается в переходе электронов через потенциальный барьер с уровнем энергии меньше высоты потенциального барьера, при этом электроны своей энергии не теряют. Напряжение туннельного пробоя – не более единиц вольт.

При высоком обратном напряжении электроны приобретают большую скорость и, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки, выбивают из них новые электроны, которые также разгоняются электрическим полем и также выбивают из атома электроны. С повышением $U_{\text{обр}}$ данный процесс усиливается.

Механизм теплового пробоя:

$$t_{pn}^{\circ} \uparrow \Rightarrow R_{pn} \downarrow \Rightarrow I_{обр} \uparrow = P_{подв} = I_{обр} \uparrow \cdot U_{обр} \Rightarrow t_{pn}^{\circ} \uparrow \Rightarrow \text{перегрев}$$

Теплового пробоя можно избежать, если отводить избыточное тепло от перехода, например на корпус прибора (диода), чтобы рассеивать тепло в окружающую среду устанавливают **радиатор**.



Пример радиатора

Теоретическая ВАХ диода

Математически теоретическая ВАХ диода описывается выражением:

$$I_{д} = I_0 \left(e^{\frac{U_{д}}{m\phi_T}} - 1 \right), \quad \phi_T = \frac{k \cdot T}{e} = \frac{T}{11600},$$

где m – коэффициент, зависящий от материала полупроводника: $m = 1$ – Ge, $m = 2$ – Si ;

I_0 – тепловой ток (ток насыщения);

$I_{д}$ – ток диода;

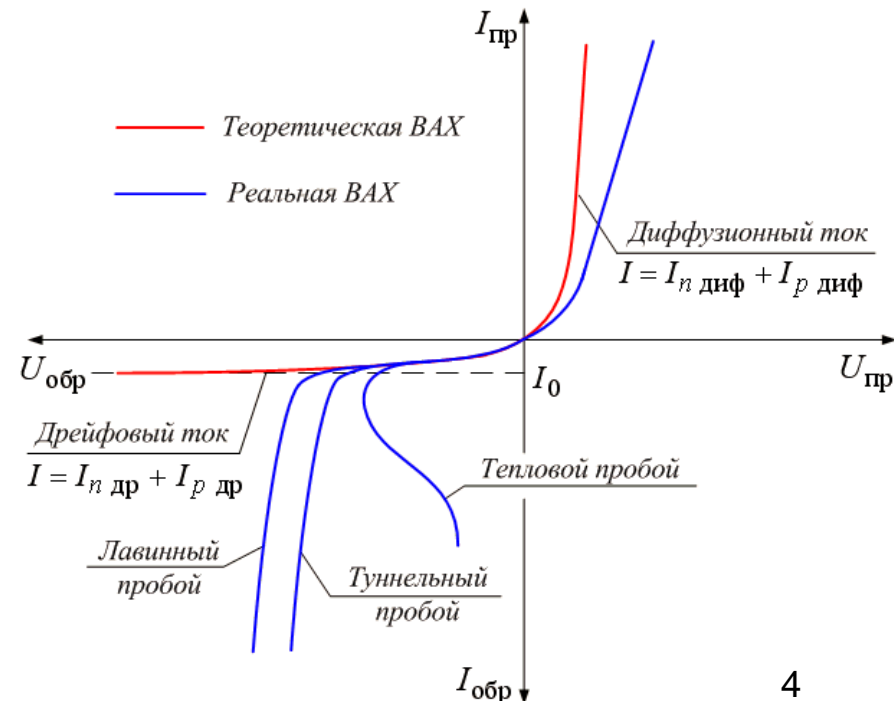
$U_{д}$ – напряжение на диоде с соответствующим знаком;

ϕ_T – температурный потенциал при комнатной температуре: $t = 20^{\circ}\text{C}$, $\phi_T \approx 25\text{мВ}$;

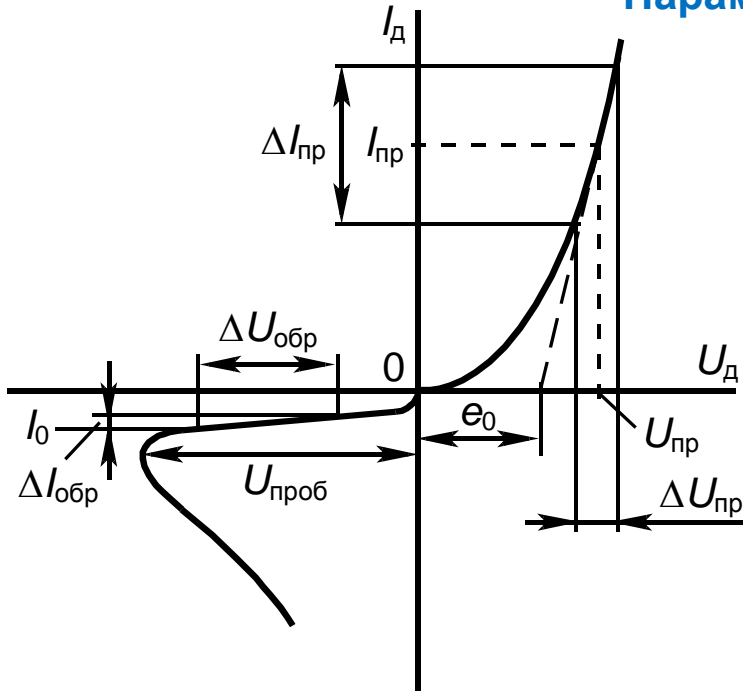
$t = 27^{\circ}\text{C}$, $\phi_T \approx 26\text{мВ}$;

$k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.



Параметры реальной ВАХ диода



При анализе электронных цепей с диодами используются следующие параметры:

e_0 – напряжение отсечки («пятка ВАХ»);

I_0 – тепловой ток, протекающий через запертый $p-n$ -переход;

$U_{проб}$ – напряжение пробоя – обратное напряжение, при котором происходит электрический пробой $p-n$ -перехода;

$R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}$ – прямое статическое сопротивление $p-n$ -перехода (сопротивление постоянному току);

$r_{пр} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}}$ – дифференциальное (динамическое) сопротивление $p-n$ -перехода (сопротивление переменному току);

$R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}}$ – обратное статическое сопротивление $p-n$ -перехода;

$r_{обр} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}}$ – обратное дифференциальное (динамическое) сопротивление $p-n$ -перехода.

Типовые значения параметров диода (**ЗНАТЬ!**)

$U_{пр\ тип} = 0,7\text{В} - \text{Si};$

$U_{пр\ тип} = 0,35\text{В} - \text{Ge}.$

$e_0 = 0,4 \div 0,6\text{В} - \text{Si};$

$e_0 = 0,2 \div 0,3\text{В} - \text{Ge}.$

$r_{пр} = \text{десятки} \div \text{сотни Ом} - \text{Si};$

$r_{пр} = \text{десятки} \div 50 \text{ Ом} - \text{Ge}.$

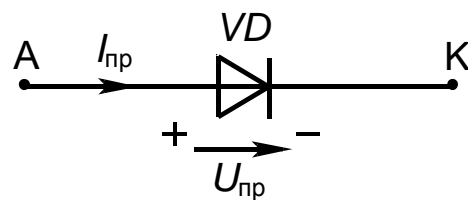
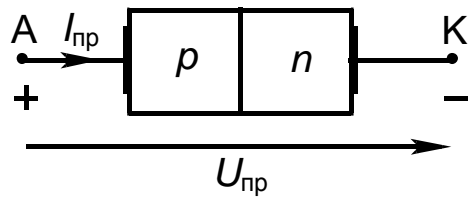
$I_0 = \text{десятки} \div \text{сотни мкА};$

$I_{0\text{ Ge}} \approx 10 \cdot I_{0\text{ Si}}.$

$r_{обр} = \text{сотни МОм} - \text{Si};$

$r_{обр} = \text{единицы МОм} - \text{Ge}.$

Включение диода в электрическую цепь



Включение диода в прямом направлении

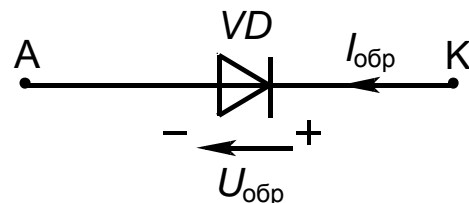
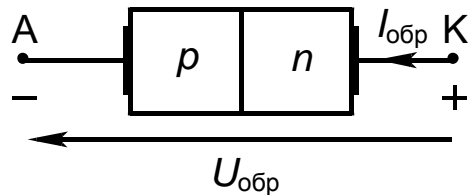
Включение диода в прямом направлении

Полярность внешнего напряжения **СОВПАДАЕТ** со знаком основных носителей заряда в полупроводниках:

«+» подключен к p -области;

«-» подключен к n -области.

Диод **ОТКРЫТ** (ВКЛЮЧЕН).



Включение диода в обратном направлении

Включение диода в обратном направлении

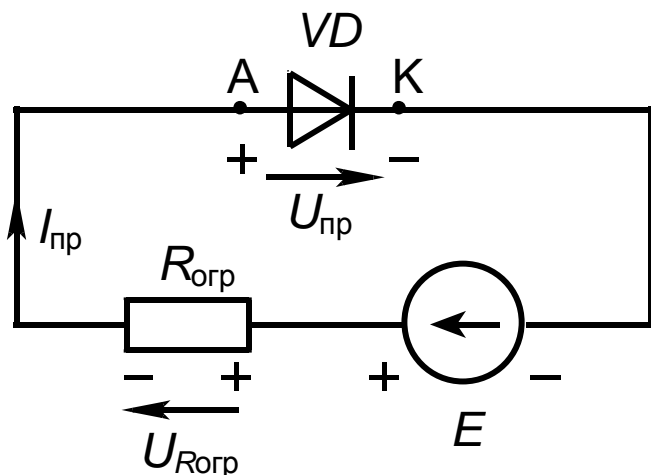
Полярность внешнего напряжения **НЕ СОВПАДАЕТ** со знаком основных носителей заряда в полупроводниках:

«+» подключен к n -области;

«-» подключен к p -области.

Диод **ЗАПЕРТ** (ВЫКЛЮЧЕН).

1. Включение диода в прямом направлении



К диоду приложено прямое напряжение и говорят, что диод (или *p-n*-переход) смещен в прямом направлении.

Внешнее прямое напряжение всегда прикладывается к диоду через ограничительный резистор $R_{огр}$.

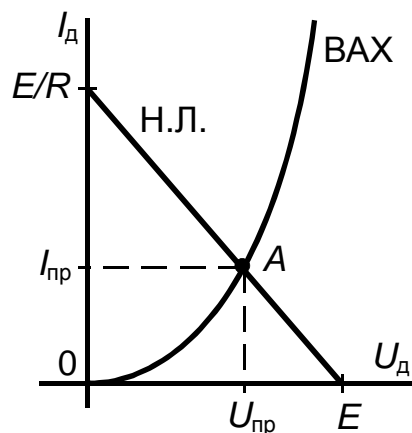
При прямом смещении *p-n*-перехода, когда $U_d > 0$, сопротивление диода **малó**, поскольку переход заполнен основными носителями заряда, поэтому прямой ток $I_{пр}$ через диод задается и ограничивается одновременно внешней цепью.

По 2-му закону Кирхгофа для данной цепи справедливо:

$$E = I_{пр} \cdot R_{огр} + U_{пр} \Rightarrow I_{пр} = \frac{E - U_{пр}}{R_{огр}}$$

Резистор $R_{огр}$ служит для защиты диода и источника питания E от перегорания («защита от дурака!»).

$U_{пр}$ – прямое падение напряжения на диоде, соответствующее точке А на ВАХ.



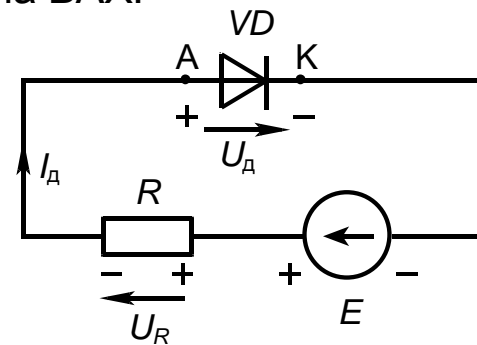
Определение $I_{пр}$ и $U_{пр}$ с помощью ВАХ.

Составляется уравнение по 2-му закону Кирхгофа:
 $E = I_d \cdot R + U_d$ - уравнение нагрузочной прямой.

Нагрузочная прямая (линия) строится по двум точкам:

1. $U_d = 0$; $I_d = E/R$;
2. $I_d = 0$; $U_d = E$.

Точка пересечения ВАХ и нагрузочной прямой соответствует точке А с координатами $(U_{пр}, I_{пр})$.



На практике $U_{пр}$ принимают равным типовому значению:

$$U_{пр\ тип} = 0,7В - Si; U_{пр\ тип} = 0,35В - Ge;$$

$I_{пр}$ – прямой ток диода, ограничивается предельно допустимым значением $I_{пр\max}$ (справочный параметр). Чтобы диод не выгорел необходимо обеспечить:

$$I_{пр} < I_{пр\max}$$

Если внешнее напряжение существенно превышает прямое, т.е. $E \ll U_{пр}$, то в расчетах последним пренебрегают

$$I_{пр} \cong \frac{E}{R_{огр}}$$

В общем случае, чтобы обеспечить смещение $p-n$ -перехода в прямом направлении внешнее напряжение должно превышать прямое, т.е. $E > U_{пр}$, в противном случае $p-n$ -переход (диод) не откроется.

Однако, если внешнее напряжение сопоставимо по величине с типовым напряжением, то для повышения точности расчетов $U_{пр}$ необходимо учитывать.

Типовые значения некоторых параметров диода, смещенного в прямом направлении:

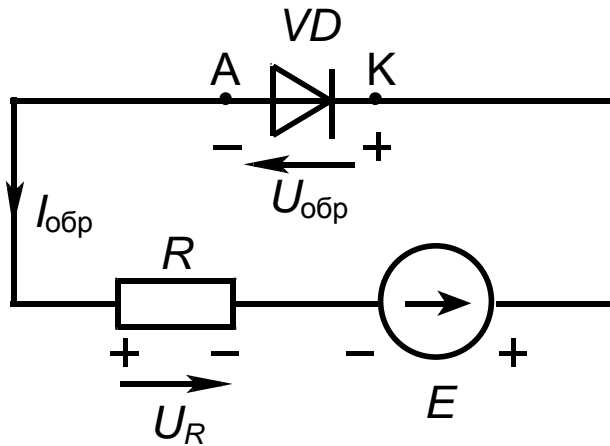
$$e_0 = 0,4 \div 0,6В - Si;$$

$$e_0 = 0,2 \div 0,3В - Ge.$$

$$r_{пр} = \text{десятки} \div \text{сотни Ом} - Si;$$

$$r_{пр} = \text{десятки} \div 50 \text{ Ом} - Ge.$$

2. Включение диода в обратном направлении



Обратное смещение осуществляется, если на диод подать внешнее обратное (запирающее) напряжение. При таком напряжении ($U_d < 0$) высота потенциального барьера повышается и количество основных носителей заряда, преодолевающих барьер экспоненциально уменьшается. В этом случае сопротивление p - n -перехода **велико** и на практике его полагают бесконечно большим. По 2-му закону Кирхгофа для данной цепи можно записать:

$$E = I_{\text{обр}} \cdot R + U_{\text{обр}}$$

Т.к. сопротивление p - n -перехода $\rightarrow \infty$, то обратный ток $I_{\text{обр}} \rightarrow 0$, поэтому

$$U_{\text{обр}} \cong E.$$

Видно, что всё внешнее напряжение приложено к диоду.

Внешнее запирающее напряжение должно быть меньше предельно-допустимого обратного напряжения (справочный параметр):

$$U_{\text{обр}} < U_{\text{обр max}}$$

В реальном случае $I_{\text{обр}} \neq 0$, $I_{\text{обр}} = I_0$, и, соответственно, I_0 называется обратным (тепловым) током и составляет:

$I_0 =$ десятки ÷ сотни мкА (справочный параметр),

причем $I_{0\text{Ge}} \approx 10 I_{0\text{Si}}$.

Т.к. тепловой ток обусловлен неосновными носителями, концентрация которых зависит от температуры, то тепловой ток также зависит от температуры, причем достаточно сильно.

Значение обратного тока удваивается при изменении температуры перехода на каждые 8°C для Si и 10°C для Ge диода:

$$I_0(t^\circ) = I_0(t_0^\circ) \cdot 2^{\frac{t^\circ - t_0^\circ}{10}} \quad - \text{Ge};$$

$$I_0(t^\circ) = I_0(t_0^\circ) \cdot 2^{\frac{t^\circ - t_0^\circ}{8}} \quad - \text{Si};$$

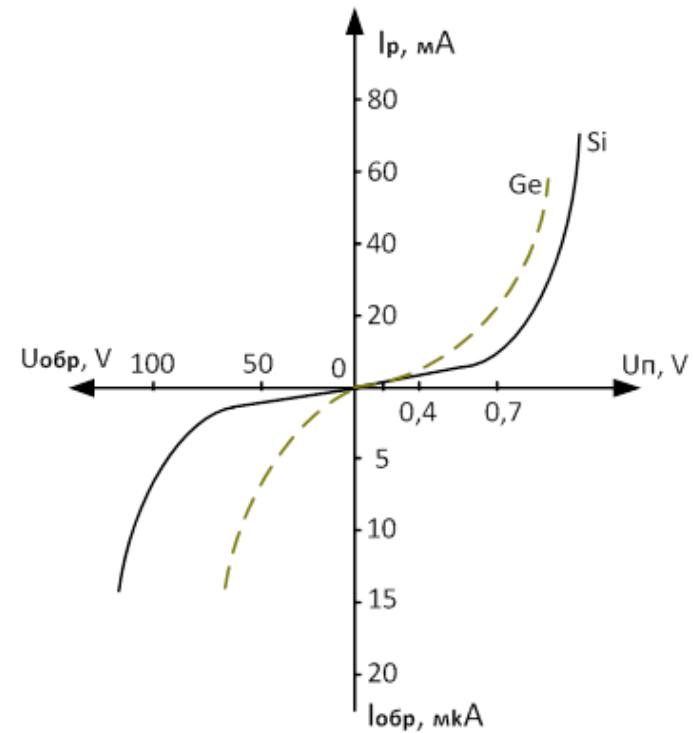
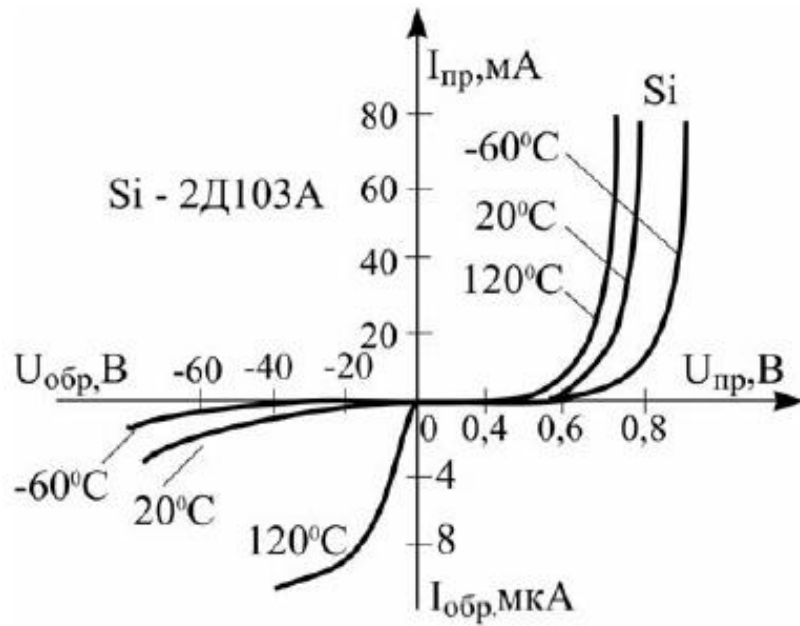
где t° - рабочая температура перехода;
 t_0° - фиксированная температура (300K).

Теоретически тепловой ток I_0 не зависит от приложенного обратного напряжения, хотя практически линейно возрастает с увеличением $U_{\text{обр}}$.

Типовые значения некоторых параметров p - n -перехода, смещенного в обратном направлении:

$$r_{\text{обр}} = \text{сотни МОм} - \text{Si};$$

$$r_{\text{обр}} = \text{единицы МОм} - \text{Ge}.$$



$$\text{ТКН} = (-) 2 \div 3 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$$

$$\text{ТКН}_{\text{тип}} = (-) 2,5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$$

$$\text{ТКН} = \left. \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta T} \right|_{I_{пр} = \text{const}}$$

– температурный коэффициент напряжения – показывает изменение прямого напряжения при заданном изменении температуры при протекании постоянного тока через *p-n*-переход.

Виды полупроводниковых диодов

- выпрямительные диоды;
- импульсные диоды;
- стабилитроны (опорные диоды);
- туннельные диоды;
- варикапы;
- фотодиоды;
- светодиоды;
- и другие.

Выпрямительные диоды

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока, т.е. для преобразования переменного напряжения в постоянное.



*Мощный
выпрямительный
диод*

Выпрямительные диоды характеризуются малыми потерями в переходе, а также способностью пропускать большие токи.

Мощные выпрямительные диоды имеют массивный корпус для отвода тепла от перехода.

Выпрямительные диоды обычно работают на частоте сети переменного тока 50-60Гц. Для выпрямления высоких напряжений (единицы-десятки кВ) используются специальные высоковольтные диоды – кремниевые (выпрямительные) столбы, состоящие из нескольких включенных последовательно диодов.

Температура $p-n$ -перехода, при которой сохраняется его работоспособность:

Ge – до 70-80°C;
Si – до 120-150°C;
AsGa – до 150°C.

Основные параметры выпрямительных диодов по Гусев, Гусев «Электроника» или «Электроника и МПТ». Подготовить конспект.



*Примеры выпрямительных
диодов*

Емкости *p-n*-перехода

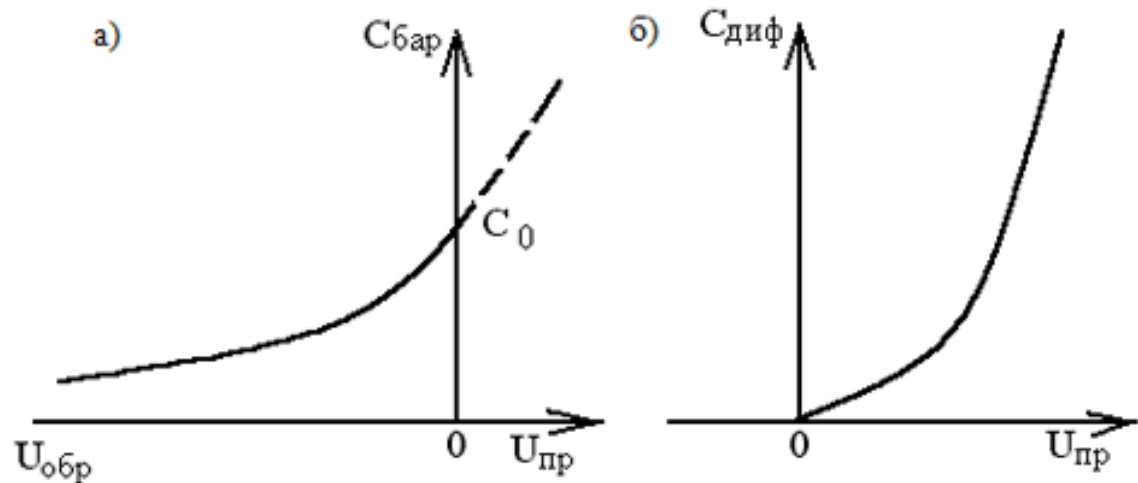
p-n-переход имеет две паразитных емкости, которые определяют частотные свойства диодов. Ранее упоминалось, что *p-n*-переход при обратном смещении подобен конденсатору со значительным током утечки в диэлектрике. Запирающий слой – диэлектрик, а объемные заряды ($+Q_{обр}$, $-Q_{обр}$) по обеим сторонам диэлектрика – обкладки конденсатора, созданные ионизированными атомами донорной и акцепторной примеси. Эту емкость называют **барьерной емкостью**.

При постоянном напряжении барьерная емкость определяется:

$$C_{бар} = \frac{Q_{обр}}{U_{обр}}$$

$C_{бар}$ = единицы ÷ сотни пФ.

При прямом напряжении *p-n*-переход обладает **диффузионной емкостью** $C_{диф}$.



Зависимость барьерной (а) и диффузионной (б) емкости от приложенного напряжения

Диффузионная емкость появляется в результате накопления подвижных носителей заряда в базе, когда после прохождения перехода носители не успевают рекомбинировать.

$$C_{диф} = \frac{Q_{диф}}{U_{пр}}$$

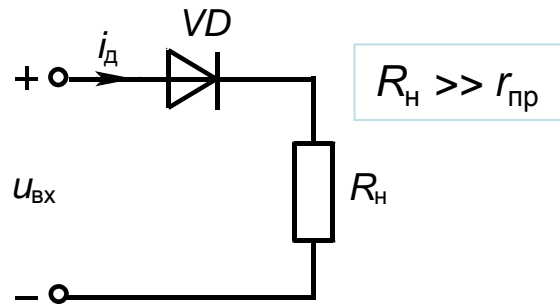
$C_{диф}$ = десятки ÷ тысячи пФ.

$$C_{диф} \gg C_{бар}$$

Влияние паразитных емкостей необходимо учитывать при использовании диодов на высоких частотах и в импульсных схемах.

Импульсные диоды

Импульсные диоды предназначены для работы в высокочастотных и импульсных схемах.



При $U_{вх} > 0$ диод открывает и через него протекает прямой ток

$$I_{m пр} \cong \frac{U_m}{R_n}$$

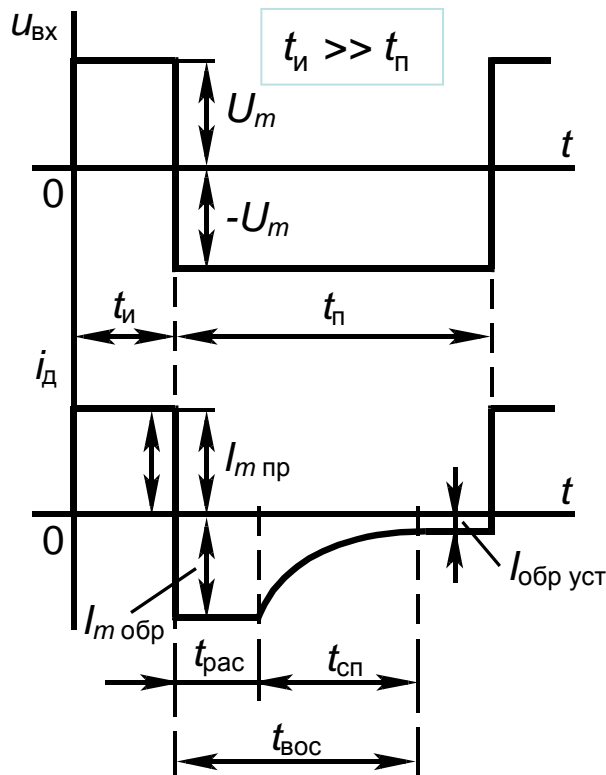
Когда входное напряжение меняет свою полярность на противоположную ($U_{вх} < 0$) обратную для диода, последний запирается, но не мгновенно, а в течение некоторого времени – **времени восстановления** ($t_{вос}$).

После подачи запирающего напряжения диод остается в проводящем состоянии и, \Rightarrow , через него протекает обратный ток, величина которого определяется внешней цепью:

$$I_{m обр} \cong -\frac{U_m}{R_n}$$

Через короткое время ($t_{рас}$ – **время рассасывания**) переход начинает запирается и в течение **времени спада** ($t_{сп}$) обратный ток экспоненциально спадает до установившегося значения $I_{обр уст}$.

Диаграммы на рисунке показаны в увеличенном временном масштабе без учета влияния барьерной емкости.



Главная причина возникновения обратного импульса – разряд диффузионной емкости. Накопленный заряд мгновенно исчезнуть не может, на это требуется время – время на рассасывание зарядов, образованных подвижными носителями. Это время называется $t_{\text{рас}}$ – **время рассасывания**.

$$t_{\text{вос}} = t_{\text{рас}} + t_{\text{сп}}$$

Чем меньше $t_{\text{вос}}$, тем лучше (т.е. диод быстрее запирается).

Для хороших диодов - $t_{\text{вос}} = 1 \text{ нс} \div 1 \text{ мкс}$.

Время восстановления определяет максимальную рабочую частоту диода:

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{10 \cdot t_{\text{вос}}}$$

Основные параметры импульсных диодов

1. $t_{\text{вос}}$ – время восстановления (доли мкс);
2. $C_{\text{д}}$ – емкость диода (доли пФ ÷ неск. пФ);
3. $U_{\text{пр max}}$ – максимальное постоянное или $U_{\text{пр и max}}$ – максимальное импульсное прямое напряжение;
4. $I_{\text{пр max}}$, $I_{\text{пр и max}}$ – максимальные постоянный или импульсный прямой токи;
5. $U_{\text{обр max}}$, $U_{\text{обр max}}$ – максимальное допустимое постоянное или импульсное обратное напряжение;
6. $t_{\text{уст}}$ – время установления прямого напряжения диода (\leq доли мкс) – временной интервал от момента подачи импульса прямого тока на диод до достижения заданного значения прямого напряжения на нем.



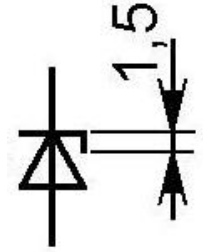
Внешний вид импульсных диодов

Стабилитроны (диоды Зенера)

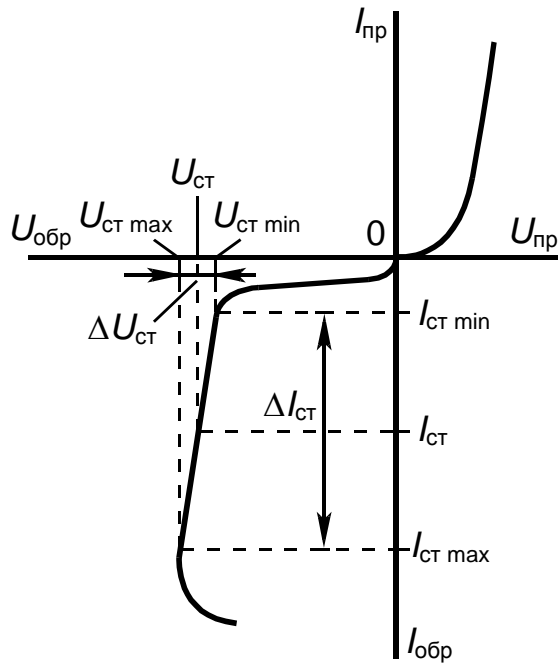
Стабилитроны предназначены для стабилизации напряжения, используются в источниках электропитания.

Стабилитроны – опорные диоды из-за их стабильного напряжения, которое используется в качестве эталонного.

В стабилитронах используется обратная ветвь ВАХ диода в области электрического пробоя.



УГО стабилитрона



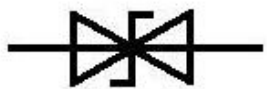
На рисунке: напряжение меняется мало, а ток стабилитрона меняется в широком диапазоне.

Для получения высоких стабильных напряжений используют последовательное соединение стабилитронов.

Основные параметры стабилитронов и их примерные значения

1. $U_{ст}$ – напряжение стабилизации, возникающее на стабилитроне при протекании через него заданного тока стабилизации $I_{ст}$ (единицы ÷ десятки В);
2. $I_{ст min}$, $I_{ст max}$ – минимальный (доли ÷ десятки мА) и максимальный (единицы мА ÷ единицы А) токи стабилитрона, соответственно;
3. $r_{диф}$ – дифференциальное сопротивление в режиме стабилизации (доли ÷ тысячи Ом);
4. Температурный коэффициент напряжения (ТКН) стабилизации, характеризует изменение $U_{ст}$ с изменением температуры, т.е. показывает относительное изменение напряжения на 1 градус в %:

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



УГО двунаправленного стабилитрона

Существуют двунаправленные стабилитроны для стабилизации и ограничения разнополярных напряжений.

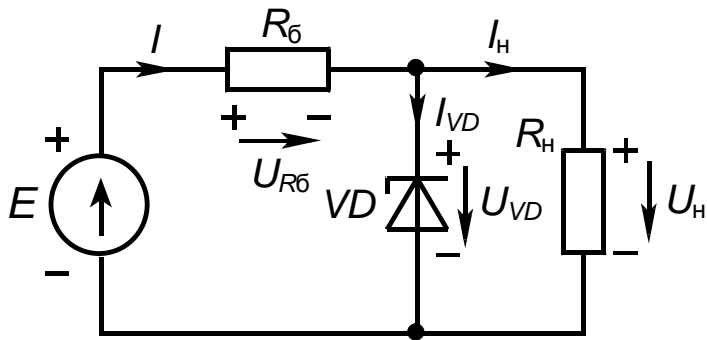


Схема параметрического стабилизатора.

R_6 – балластный резистор

Параметрический стабилизатор напряжения

Стабилизатор поддерживает неизменным напряжение на нагрузке U_H при изменении входного напряжения E и сопротивления нагрузки R_H в заданном диапазоне значений.

Основные соотношения для токов и напряжений:

$$I = I_{VD} + I_H; \quad E = I \cdot R_6 + U_{VD}.$$

Принцип действия. При изменении напряжения E будет меняться ток стабилизатора I_{VD} , но напряжение на нем, а, следовательно, напряжение на R_H будет практически постоянным.

Пример. В исходном состоянии $U_{VD} = U_{ст}$, $I_{VD} = I_{ст}$. Пусть напряжение E увеличилось, поскольку $U_{VD} = U_{ст} = U_H = \text{const}$, то возрастет ток $I_{VD} = I_{ст}$ и, следовательно, увеличится ток I :

$$\uparrow E = \uparrow I \cdot R_6 + U_H.$$

Расчет балластного сопротивления

$$R_6 = \frac{E_{ср} - U_{ст}}{I_{ср} + I_H},$$

где $E_{ср} = 0,5(E_{\min} + E_{\max})$ – среднее напряжение источника;
 $I_{ст} = I_{ср} = 0,5(I_{ст \min} + I_{ст \max})$ – средний ток стабилизатора;
 $I_H = U_{ст}/R_H$ – ток нагрузки.

Выходное сопротивление стабилизатора: $R_{\text{вых}} = R_6 \parallel r_{ст}$.

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} \text{ - динамическое сопротивление стабилизатора.}$$

Эффективность стабилизации напряжения оценивается с помощью коэффициента стабилизации, который показывает во сколько раз, относительное изменение напряжения на выходе схемы стабилизации меньше, чем относительное изменение напряжения на входе. Для рассмотренной схемы:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta E}{E} / \frac{\Delta U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}}.$$

$K_{\text{ст}}$ = обычно 20 ÷ 50.

КПД схемы не высок при больших токах вследствие потерь на балластном сопротивлении.

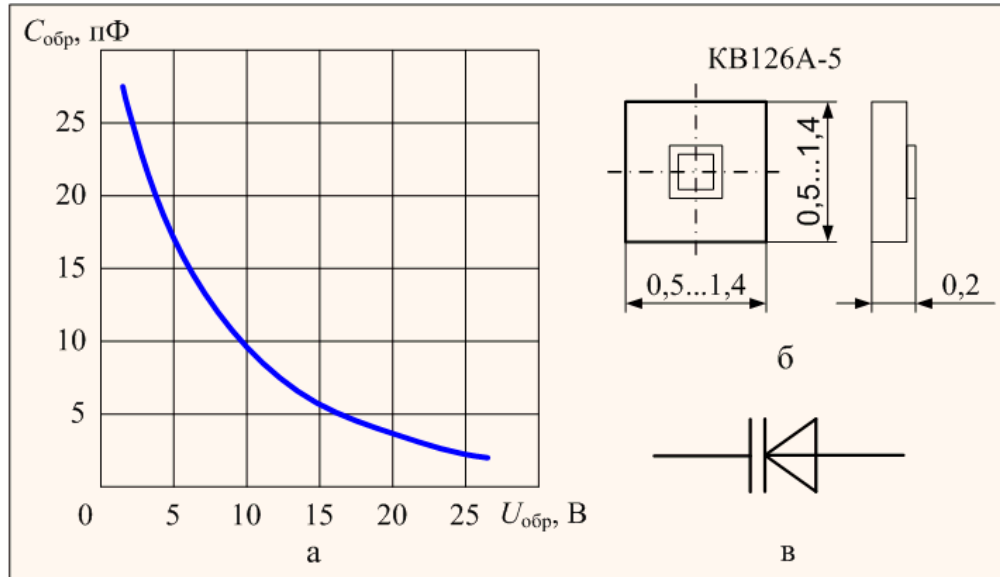
Стабисторы

Стабисторы – полупроводниковые диоды, у которых для стабилизации напряжения используется прямое напряжение, слабо зависящее от тока. Прямая ветвь ВАХ на соответствующем участке почти вертикальная.

Значение напряжения стабилизации не более 0,7В у кремниевых диодов, поэтому стабистор предназначен для стабилизации и ограничения малых напряжений. ТКН у стабисторов – отрицательный.

Варикапы

Варикапы – полупроводниковые диоды, предназначенные для работы в качестве конденсатора с управляемой емкостью.



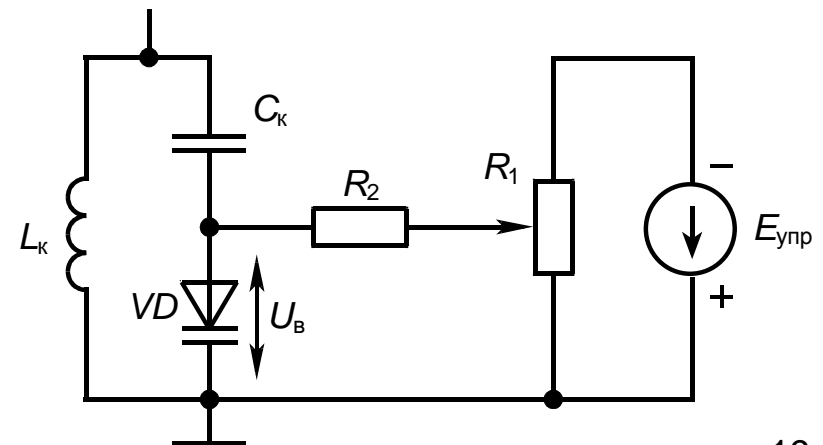
На рисунке: а) вольт-фарадная характеристика варикапа; б) конструкция варикапа; в) УГО варикапа.

Варикапы используют зависимость барьерной емкости $p-n$ -перехода от приложенного обратного напряжения.

Основные параметры варикапа

1. $C_{ном}$ – номинальная емкость варикапа (при $U_{обр} = const$) составляет десятки ÷ сотни пФ.
2. $K_C = C_{в max} / C_{в min}$ – коэффициент перекрытия по емкости при двух заданных $U_{обр}$ (единицы ÷ десятки).
3. и другие.

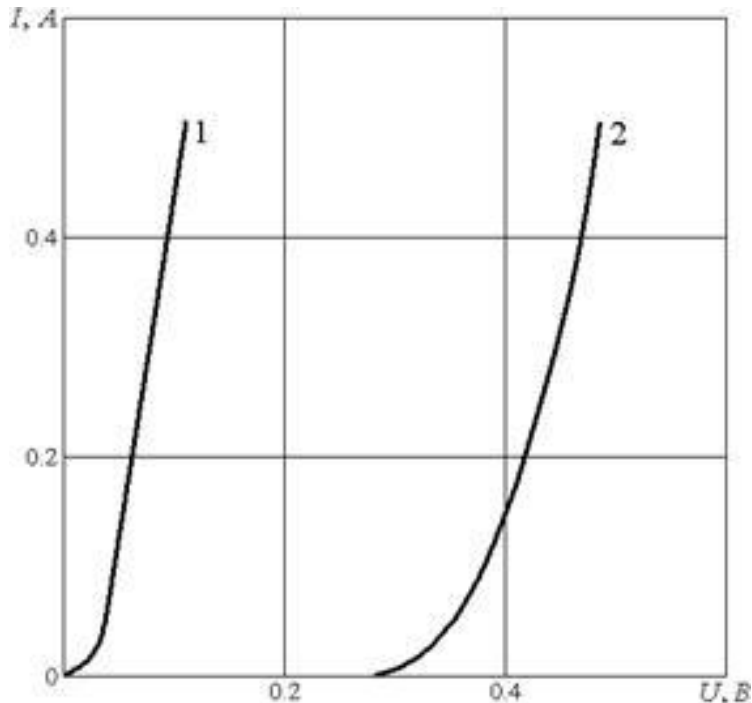
Практическое применение



Резонансный (параллельный) колебательный контур перестраивается при изменении напряжения на варикапе U_B . Резистор R_2 выбирается достаточно большим, чтобы цепь управления не оказывала влияние на добротность контура.

Диоды Шоттки

Диоды с барьером Шоттки построены на переходе металл-полупроводник. Они имеют малое падение напряжение, практическое отсутствие заряда восстановления и ток через переход обусловлен одним типом носителей, поэтому это быстродействующие приборы (до 20ГГц). Их используют в качестве импульсных и высокочастотных диодов. Прямая ветвь ВАХ диодов Шоттки представляет собой идеальную экспоненту, поэтому их используют в качестве логарифмирующих диодов.



На рисунке:

- 1) ВАХ диода Шоттки;
- 2) ВАХ обычного p-n-перехода.

Диоды Шоттки применяют в выпрямителях больших токов (десятки ÷ сотни А) при частотах выпрямления до 300МГц.

Диоды имеют малое прямое напряжение $\approx 0,25 \div 0,5В$.

Недостатки: сравнительно небольшое обратное напряжение ($U_{обр} < 250В$) и большие обратные токи.

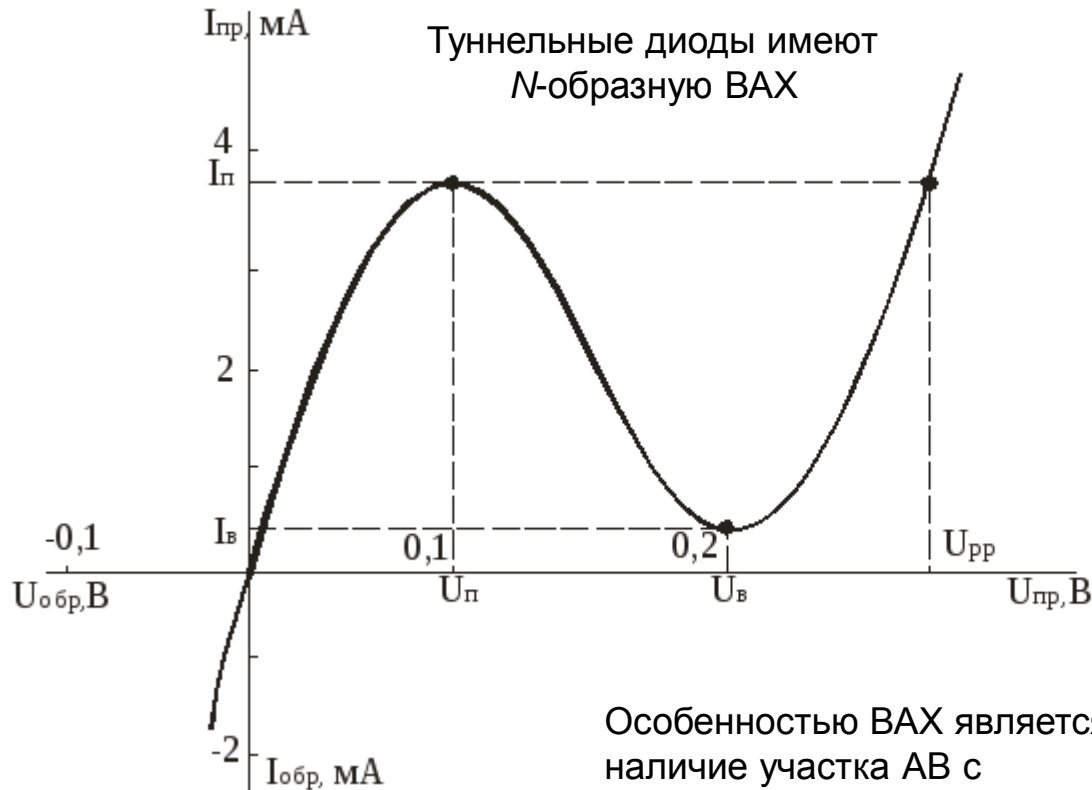
Используются также для создания высокоскоростных логических элементов и в импульсных источниках питания.



УГО диода Шоттки

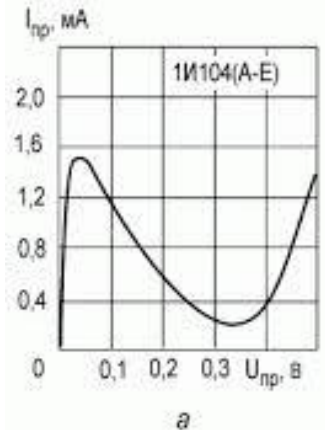
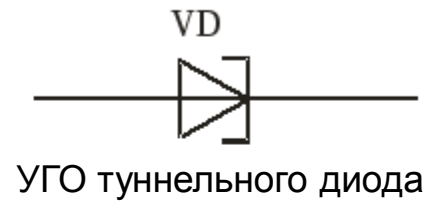
Туннельные диоды

Принцип действия основан на явлении туннельного эффекта (открыт 1920-х годах Олегом Лосевым, переоткрыт в 1958 Лео Эсаки) при включении в прямом направлении. Туннельный эффект заключается в переходе через потенциальный барьер электронов с уровнем энергии меньше высоты потенциального барьера, при этом электроны своей энергии не теряют.



$$r_{\text{диф}} = -\frac{\Delta U_{AB}}{\Delta I_{AB}}$$

Это свойство позволяет применять туннельный диод в качестве усилительного элемента и основного элемента генераторов.



Туннельные диоды обладают малой емкостью перехода (доли единицы пФ) и поэтому нашли свое применение на частотах более 1 ГГц и до 30 ÷ 100 ГГц.

Характерные параметры ВАХ:

- $I_{\text{п}}$ – пиковый ток;
- $I_{\text{в}}$ – ток впадины;
- $U_{\text{п}}$ – напряжение пика;
- $U_{\text{в}}$ – напряжение впадины.