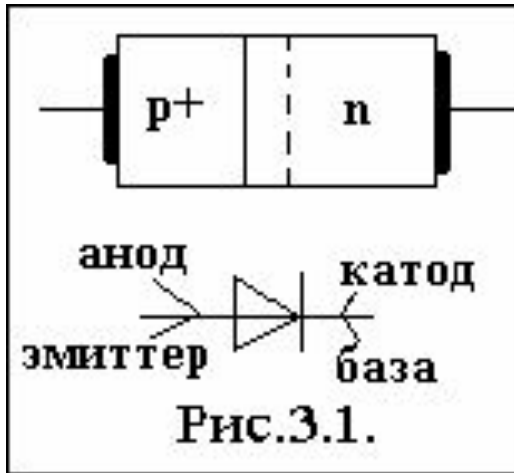


Глава 2

Полупроводниковые диоды



Полупроводниковый диод представляет собой полупроводниковый прибор с одним $p-n$ переходом и двумя выводами. Большинство диодов изготовлены на основе несимметричных $p-n$ -переходов. При этом одна из областей диода, обычно ($p+$) высоколегированна и называется эмиттер, другая (n) - слаболегированная - база. $P-n$ -переход размещается в базе т.к она слаболегирована.

Структура, условное обозначение и название выводов показаны на рис. 3.1. Между каждой внешней областью полупроводника и ее выводом имеется омический контакт, который на рис. 3.1 показан жирной чертой.

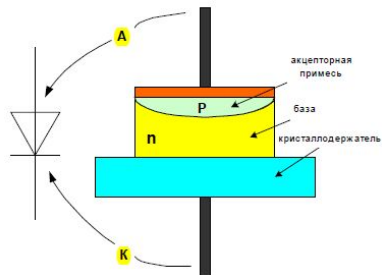
Классификация диодов.

1. В зависимости от геометрических размеров $p-n$ -переходов различают: точечные и плоскостные.

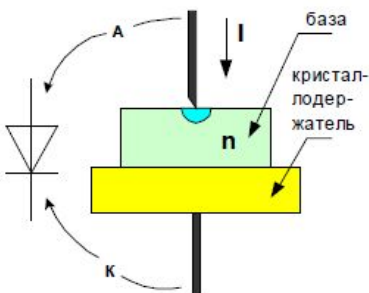
2. В зависимости от технологии изготовления различают: диоды, сплавные и микросплавные, с диффузионной базой, эпитаксиальные и др.

3. По функциональному назначению диоды делятся: выпрямительные, универсальные, импульсные, стабилитроны и стабилитроны, варикапы, туннельные и обращенные, а также СВЧ-диоды и др.

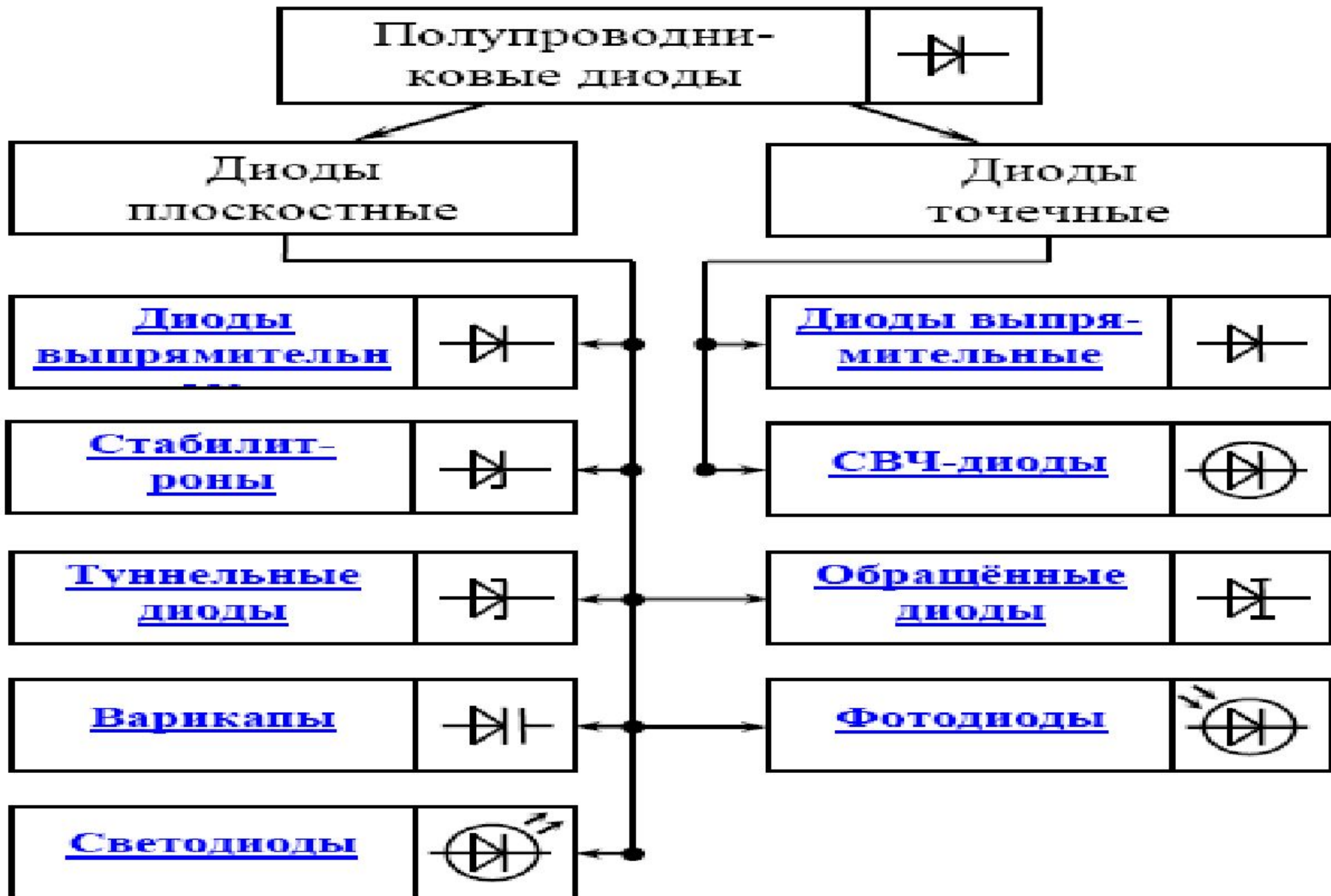
Плоскостной диод



Точечные диоды.



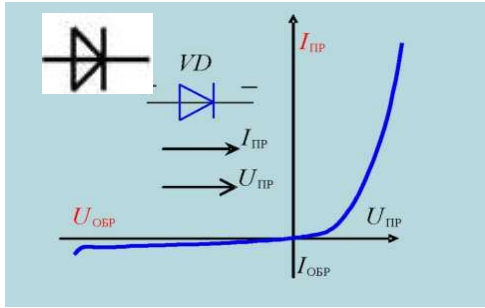
Классификация диодов по функциональному назначению и их УГО



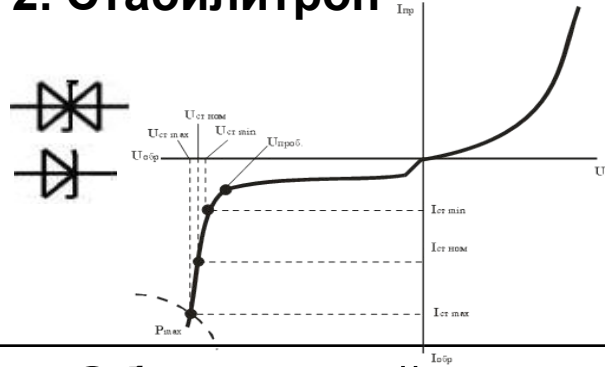
Полупроводниковые диоды. Классификация

Полупроводниковый диод – это электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним р-п-переходом и двумя выводами, в котором используются различные свойства р-п-перехода (односторонняя проводимость, электрический пробой, электрический пробой, эл. емкость, туннельный эффект),..

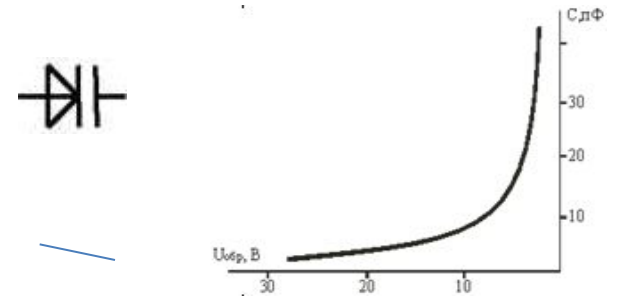
1. Выпрямительный диод



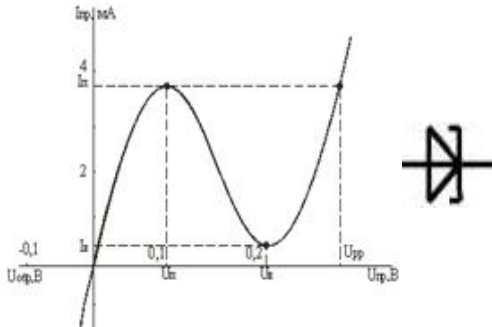
2. Стабилитрон



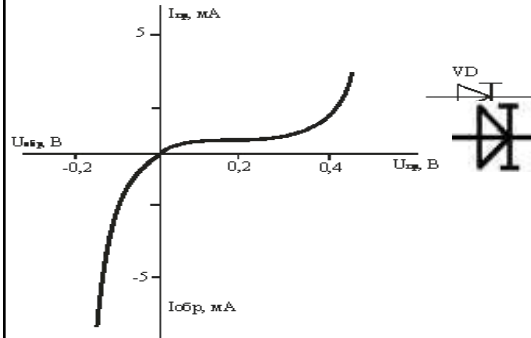
3. Варикап



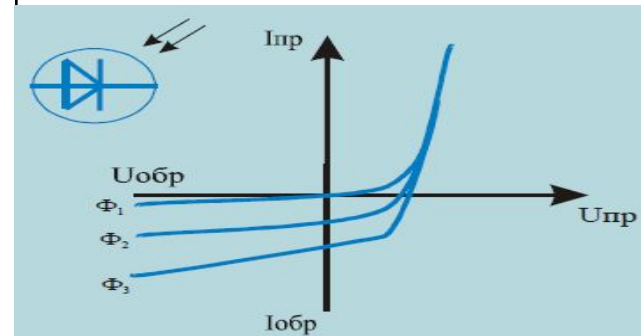
4. Туннельный диод



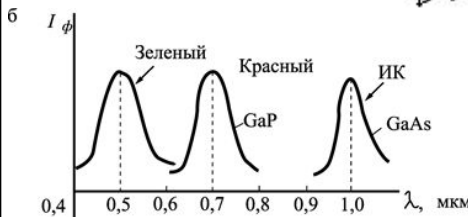
5. Обращенный диод



6. Фотодиод



7. Светодиод

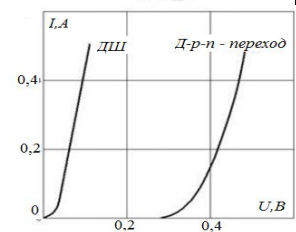
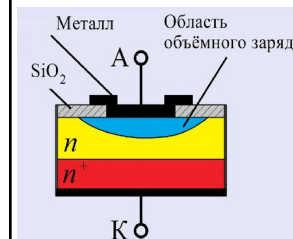
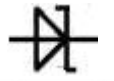


8. СВЧ диоды



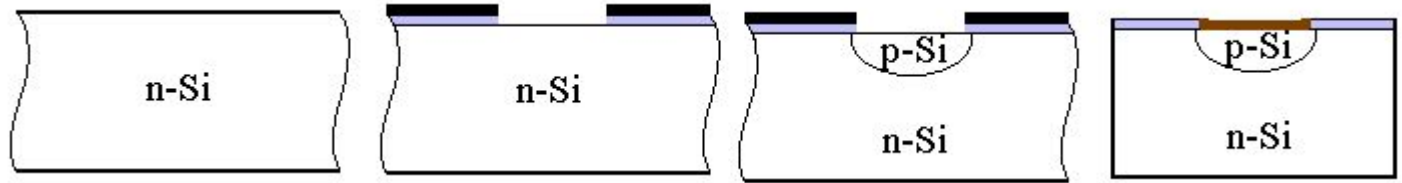
К числу самых распространённых видов СВЧ диодов относят:
 Лавинно-пролётный (диоды Р-I-N диод;
Диод Ганна;
 Точечно-контактный диод;
Диод Шоттки или Мотта

9. Диоды Шоттки

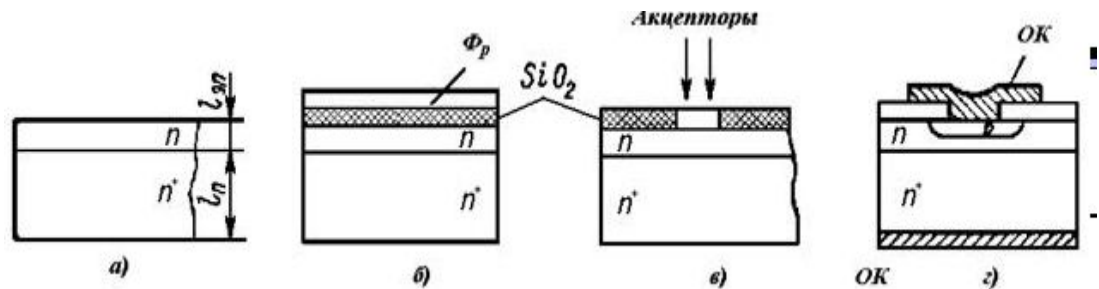


Технологии изготовления диодов

1. Планарная технология



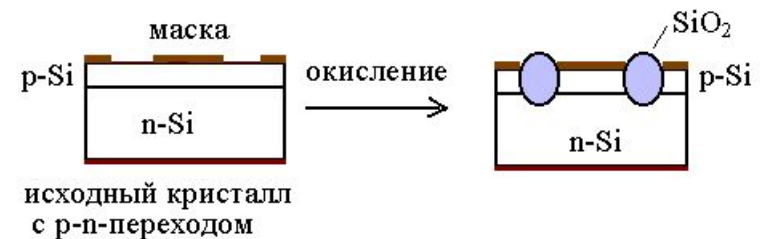
2. планарная эпитаксиальная и эпитаксиально-диффузионная технологии (Эпитаксиальная технология позволяет получать переходы с малой толщиной базы).



3. меза-диффузионная и меза-эпитаксиальная технологии - уменьшение площади перехода (для уменьшения емкостей и увеличения рабочих частот) специальным травлением



4. ЛОКОС-технология - уменьшение площади перехода локальным объемным окислением



Конструктивно выпрямительные диоды оформляются в металлических, пластмассовых или керамических корпусах

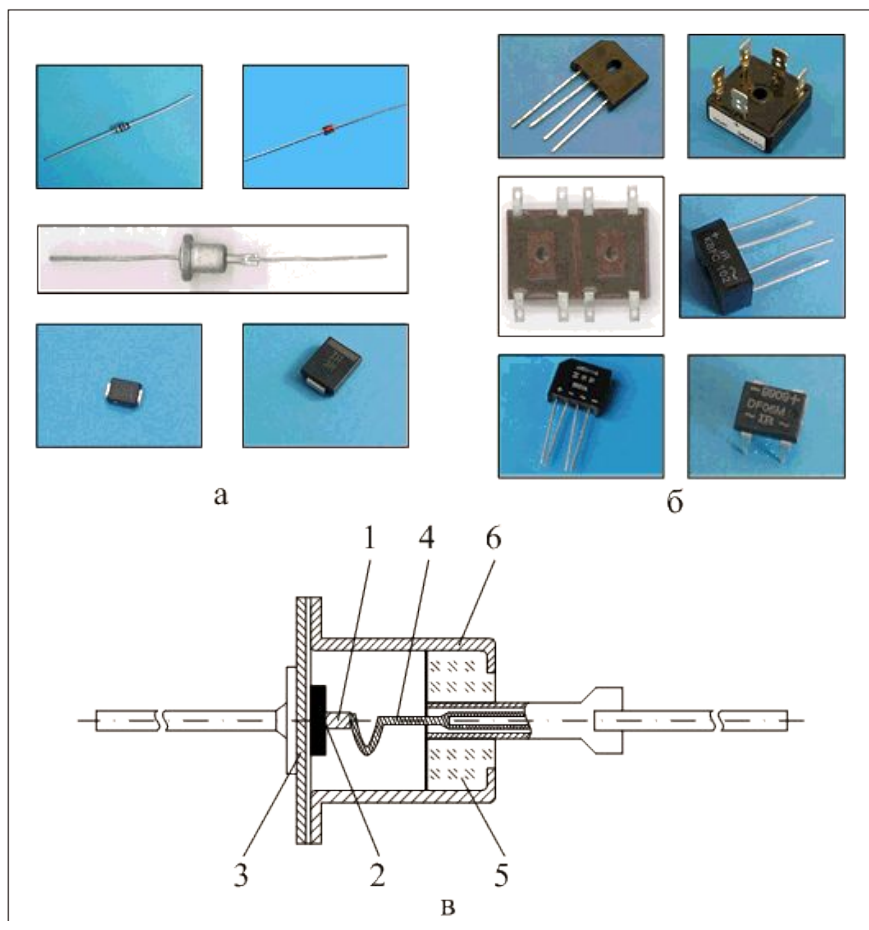


Рис. 2.4. Выпрямительные диоды маломощные диоды: дискретное исполнение (а); диодные мосты (б) и конструкция одного из маломощных диодов (в)

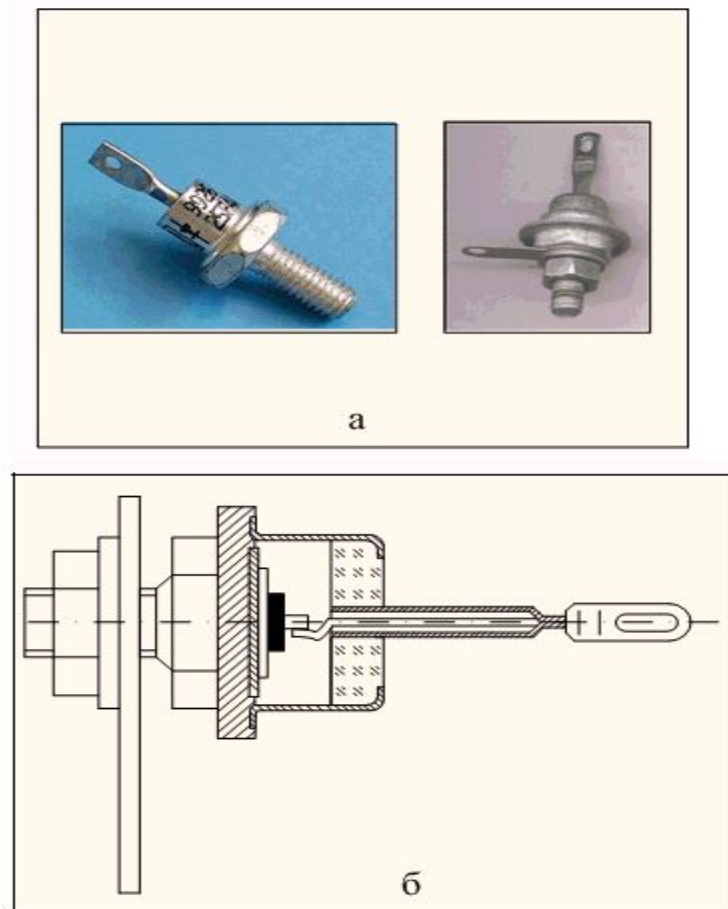
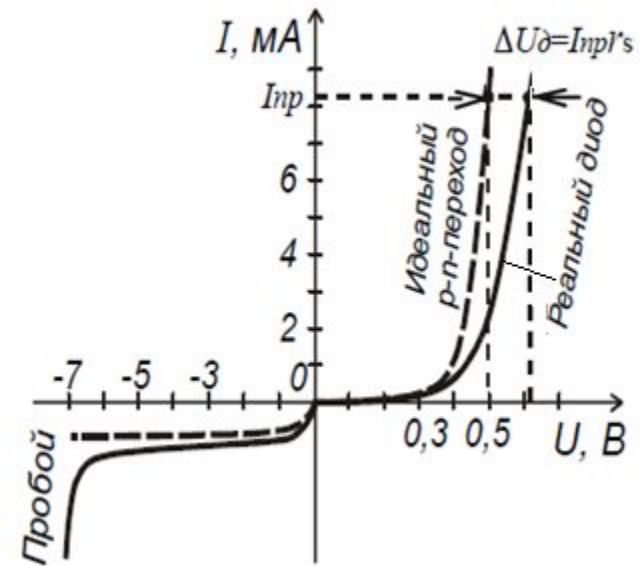


Рис. 2.5. Общий вид (а) и конструкция (б) мощного кремниевого выпрямительного диода

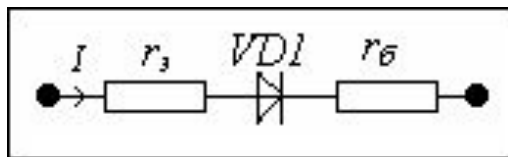
2.1. Вольт-амперная характеристика диода



ВАХ реального диода (2) имеет ряд отличий от ВАХ p-n-перехода (1).

При прямом смещении необходимо учитывать объёмное сопротивление областей базы r_b и эмиттера $r_э$ диода (рис.3.3.), обычно $r_b \gg r_э$. В результате напряжение непосредственно на p-n-переходе будет меньше напряжения, приложенного к внешним выводам диода. Это приводит к смещению прямой ветви ВАХ вправо (2) и почти линейной зависимости от напряжения.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right) \quad (1)$$



$$I = I_0 \left(e^{\frac{U - I r_b}{\Phi_T}} - 1 \right), \quad (2)$$

где $U_{пр}$ — напряжение, приложенное к выводам; r — суммарное сопротивление базы и электродов диода, обычно $r = r_b$.

При обратном смещении диода ток диода не остается постоянным равным I_0 т.е. наблюдается рост обратного тока.

Это объясняется тем, что обратный ток диода состоит из трех составляющих:

$$I_{обр} = I_0 + I_{тг} + I_{ут}$$

где I_0 — тепловой ток перехода;

$I_{тг}$ — ток термогенерации. Он возрастает с увеличением обратного напряжения. Это связано с тем, что p-n перехода расширяется, увеличивается его объем и следовательно увеличивается количество неосновных носителей, образующихся в нем за счёт термогенерации. Он на 4-5 порядка больше тока I_0 .

$I_{ут}$ — ток утечки. Он связан с конечной величиной проводимости поверхности кристалла, из которого изготовлен диод. $I_{тг} \gg I_{ут}$.

При больших обратных напряжениях наблюдается пробой диода.

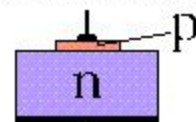
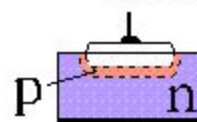
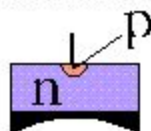
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ (VD)

СТРУКТУРА

ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА

ТОЧЕЧНОГО ДИОДА

ПЛОСКОСТНОГО ДИОДА

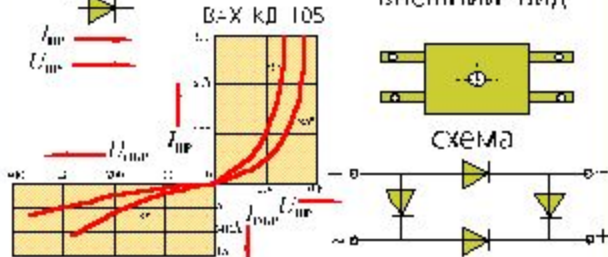


сплавной

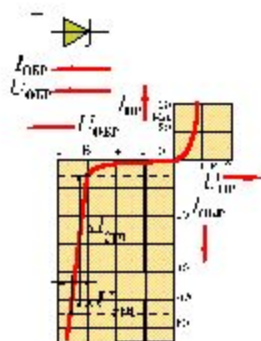
диффузионный

ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

выпрямительный блок КЦ 402
внешний вид



СТАБИЛИТРОНЫ

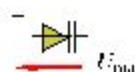


$$R_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$$

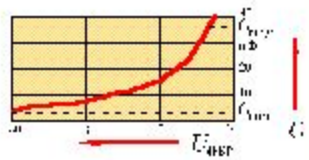
$$\gamma_{КС} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T} \cdot 100\%$$

-температурный коэффициент напряжения (%/°C)
(-0,65 ... +0,2)

ВАРИКАПЫ



C_D при $U_{обр} = (2 \dots 5) В$
(10 ... 500) пФ

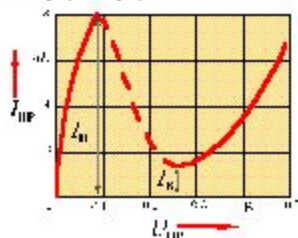


$$K_c = \frac{C_{max}}{C_{min}}$$

-коэффициент перекрытия емкости (5 ... 20)

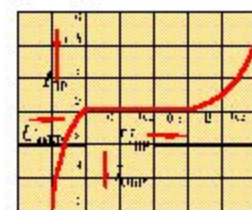
ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

$I_{п}$ - ток пика
 $I_{н}$ - ток впадины
 $I_{п}/I_{н} = (5 \dots 20)$



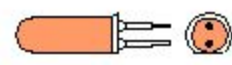
ОБРАЩЕННЫЕ ДИОДЫ

$I_{об} = 0$ при $U_{об} < 0,3 В$

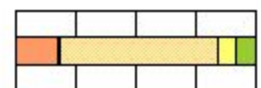


СВЕТОДИОДЫ

внешний вид светодиода АТЗ 16



$I_{об}$ через p-n переход, красного цвета свечения



$I_{об}$ через p-n переход, зеленого цвета свечения

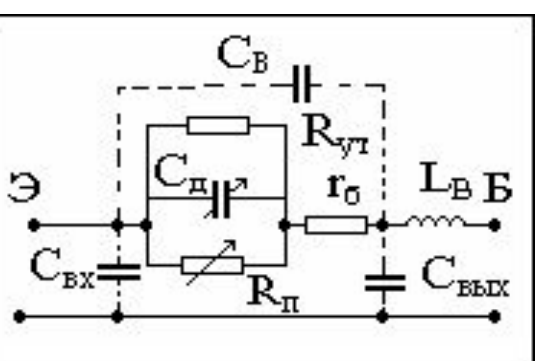
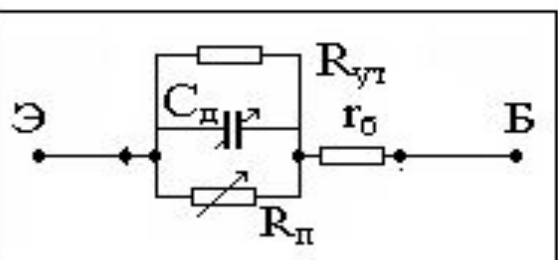
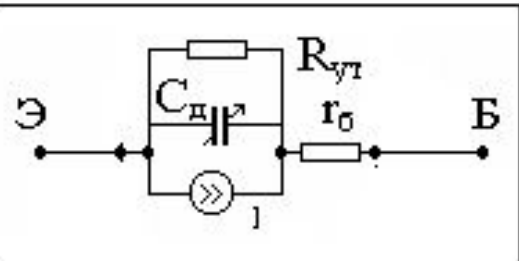
К Д 104 А

СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ ДИОДОВ ПО ГОСТ - 113369-19-81

- разновидность данного типа диодов
- порядковые номера разработки технологического типа диода
- подкласс диода (Д-выпрямительные; И-импульсные; С-стабилитроны; Ц-выпрямительные столбы и блоки; В-варикапы; Т-туннельные)
- исходный материал (Г или 1 германий; К или 2 кремний; А или 3 соединения галлия; И или 4 соединения индия)



2.2. Эквивалентные схемы диода



1. Физические схемы замещения,

состоит из электрических элементов, которые учитывают физические процессы, происходящие в диоде, и влияние элементов конструкции.

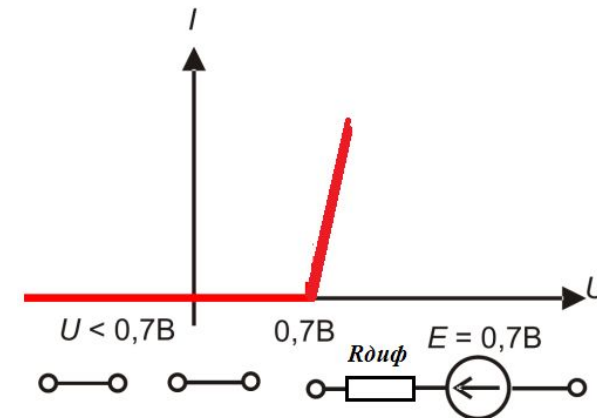
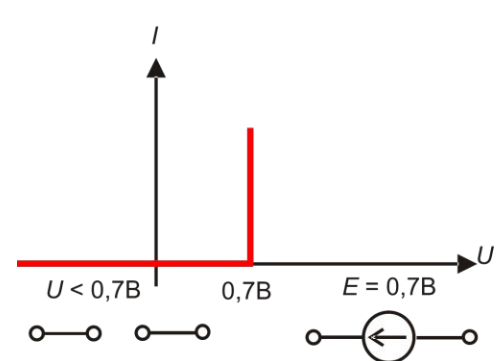
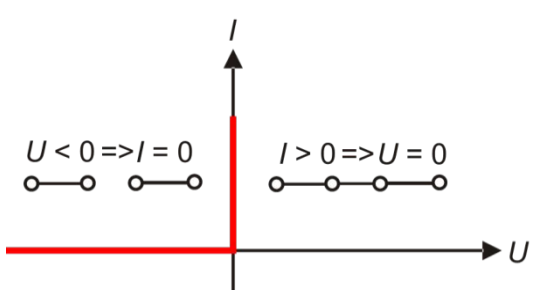
Эквивалентная схема при больших сигналах учитывает нелинейные свойства p-n-перехода путем замены дифференциального сопротивления на зависимый источник тока (рис.3) $I = I_0(e^{U/\phi T} - 1)$.

Здесь **Cд** — общая емкость диода, зависящая от режима;
rб — объемное сопротивление области базы диода;
Rут — сопротивление утечки.

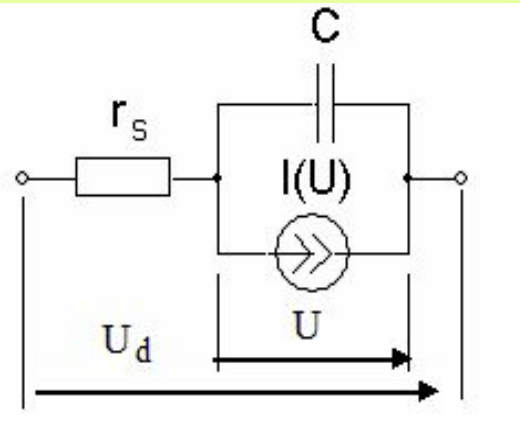
Эквивалентная схема замещения p-n перехода при малых сигналах, можно не учитывать нелинейных свойств диода (рис.1 и рис.2).

Rп = Rдиф — дифференциальное сопротивление перехода, в заданной рабочей точке ($R_{диф} = \Delta U / \Delta I | U = const$);
 Иногда схему замещения дополняют Cв, Cвх и Cвых и Lвб.

2. Схемы замещения по виду ВАХ (рис.4,5,6)



SPICE модель диода



Эквивалентная схема, соответствующая этой модели, изображена на рис. Ток диода I определяется напряжением, приложенным к переходу U , и описывается выражением

$$I(U) = I_0 \cdot \left(e^{\frac{n \cdot \varphi_t}{U}} - 1 \right) - I_{\text{проб}}$$

где n – коэффициент неидеальности ВАХ; $I_{\text{проб}}$ – обратный ток пробоя.

Обратный ток пробоя определяется формулой

$$I_{\text{проб}} = \begin{cases} 0; & \text{при } U \geq (1 + U_{\text{проб}}), \\ I_{\text{проб}0} \cdot (1 + U_{\text{проб}} - U)^E; & \text{при } U \leq (1 + U_{\text{проб}}), \end{cases}$$

где $U_{\text{проб}}$ – напряжение пробоя; $I_{\text{проб}}$ – ток насыщения пробоя, E – параметр степенного закона тока пробоя.

Емкость перехода представляет собой сумму барьерной и диффузионной емкостей $C = C_{\text{бар}} + C_{\text{диф}}$.

Зависимость барьерной емкости (обусловленной наличием обедненного слоя диода) от напряжения на переходе – вольт-фарадная характеристика (ВФХ) – описывается выражением

$$C_{\text{бар}} = \begin{cases} C_0 \cdot \left(1 + \frac{|U|}{\varphi_k} \right)^{-\gamma}; & \text{при } U \leq 0,8 \times \varphi_k, \\ C_0 \times 0,2^{-\gamma}; & \text{при } U > 0,8 \times \varphi_k, \end{cases}$$

Диффузионная емкость, отражающая процессы накопления носителей заряда в р- и n-областях диода, определяется по формуле

$$C_{\text{диф}} = t_{\text{пр}} \cdot \frac{\partial I}{\partial U} = \frac{t_{\text{пр}}}{r_{\text{диф}}} \approx \frac{t_{\text{пр}} \cdot I(U)}{\varphi_T}$$

SPICE параметры диодов

SPICE параметры диодов

Обозначение	Название	Параметр	Единицы измерения	Значение по умолчанию
I_S	IS	Ток насыщения (диодное уравнение)	А	1E-14
R_S	RS	Паразитное сопротивление (последовательное сопротивление)	Ом	0
n	N	Коэффициент эмиссии, от 1 до 2	–	1
t_D	TT	Время переноса заряда	с	0
$C_D(0)$	CJO	Емкость перехода при нулевом смещении	Ф	0
ϕ_0	VJ	Контактная разность потенциалов перехода	В	1
m	M	Коэффициент плавности перехода	–	0,5
		для линейно легированного перехода		0,33
		0,5 для лавинного перехода		

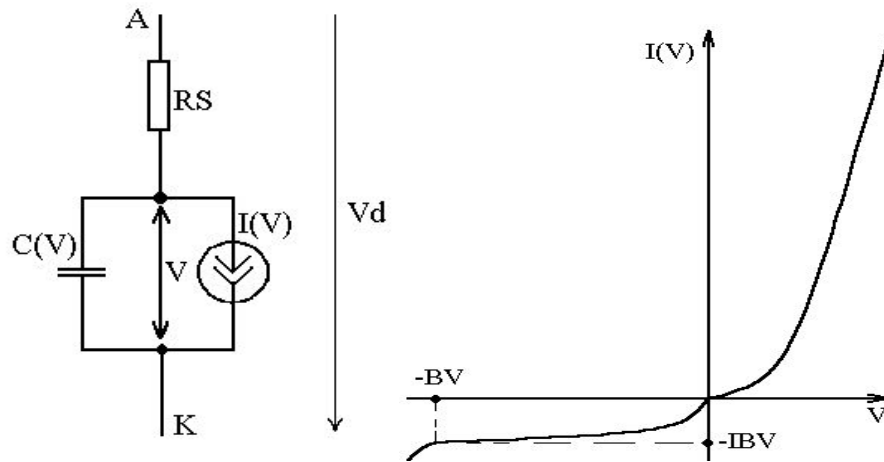
E_g	EG	Ширина запрещенной зоны	эВ	1,11
		Si (кремний)	эВ	1,11
		Ge (германий)	эВ	0,67
		Шоттки	эВ	0,69
p_i	XTI	Температурный экспоненциальный коэффициент тока насыщения	–	3,0
		pin переход	–	3,0
		Шоттки	–	2,0
k_f	KF	Коэффициент фликер-шума	–	0
a_f	AF	Показатель степени в формуле фликер-шума	–	1
FC	FC	Коэффициент емкости обедненной области при прямом смещении	–	0,5
BV	BV	Обратное напряжение пробоя	В	∞
IBV	IBV	Обратный ток пробоя	А	1E-3

SPICE модель диода

1.1 Статический режим

Ток диода I состоит из нескольких составляющих: $I = Area \cdot (I_{fwd} - I_{rev})$.

Компонента $I_{fwd} = I_n \cdot K_{inj} + I_{rec} \cdot K_{gen}$ - аппроксимирует вольт-амперную характеристику (ВАХ) диода без учета явления пробоя в области отрицательных напряжений. Здесь $I_n = I_S \cdot (e^{V/(N \cdot V_t)} - 1)$ - нормальная составляющая тока; $I_{rec} = I_{SR} \cdot (e^{V/(NR \cdot V_t)} - 1)$ - ток рекомбинации; K_{inj} - коэффициент инжекции;



$K_{gen} = [(1 - V/V_J)^2 + 0,005]^{M/2}$ - коэффициент генерации

Схема замещения полупроводникового диода (рис.1) состоит из идеального диода, изображенного в виде нелинейного зависимого источника тока $I(V)$, емкости р - н - перехода $C(V)$ и объемного сопротивления базы R_S . Список параметров математической модели диода приведен в табл. 1.

Составляющая I_n отражает ток неосновных носителей заряда. Ток I_n умножается на коэффициент K_{inj} , учитывающий замедление роста тока при высоких уровнях инжекции.

Составляющая I_{rec} отражает ток основных носителей заряда через р-п переход, уточняет ВАХ в области низких уровней инжекции, описывая относительно медленное нарастание тока при низких напряжениях. Коэффициент K_{gen} позволяет учесть зависимость тока I_{rec} от ширины перехода, которая в свою очередь зависит от напряжения на переходе V .

Компонента

$$I_{rev} = I_{rev_high} + I_{rev_low}$$

отражает явление пробоя при отрицательном напряжении на переходе. Здесь

$$I_{rev_high} = IBV \cdot e^{-(V+BV)/(NBV \cdot V_t)}$$

$$I_{rev_low} = IBVL \cdot e^{-(V+BV)/(NBVL \cdot V_t)}$$

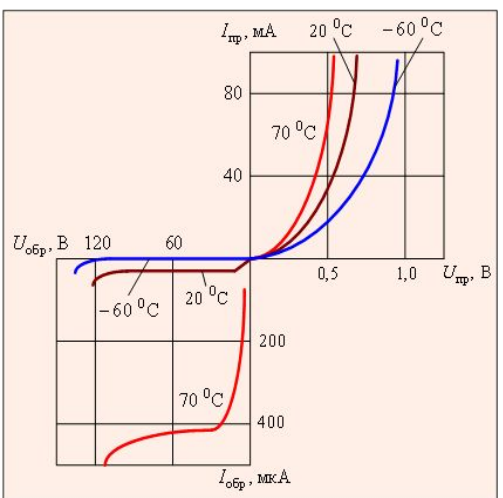
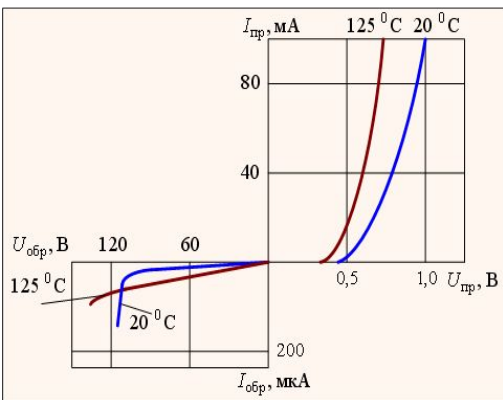
$$K_{inj} = \begin{cases} \frac{IKF}{1 + IKF} & \text{при } IKF > 0; \\ 1 & \text{при } IKF \leq 0; \end{cases}$$

Параметры BV , IBV , $IBVL$, NBV , $NBVL$ позволяют более точно смоделировать ВАХ диода в области пробоя.

Список параметров математической модели диода приведен в табл. 1.

Имя параметра	Параметр	Значение по умолчанию	Ед. изм.
IS	Ток насыщения при номинальной температуре (тепловой диффузионный ток)	10^{-14}	А
RS	Объемное сопротивление базы	0	Ом
N	Коэффициент неидеальности тока насыщения	1	-
ISR	Тепловой ток рекомбинации	0	А
NR	Коэффициент неидеальности тока рекомбинации	2	-
IKF	Ток перегиба ВАХ при высокой инжекции	∞	А
TT	Время переноса (пролета) заряда	0	С
CJO	Барьерная емкость р-п перехода при нулевом смещении	0	Ф
VJ	Контактная разность потенциалов (высота потенциального барьера)	1	В
M	Коэффициенты аппроксимации зависимости барьерной емкости от	0,5	-
FC		0,5	-

2.3. Влияние температуры на ВАХ диода



При увеличении температуры возрастает концентрация неосновных носителей в кристалле полупроводника, что увеличивает обратного тока перехода (за счет тока I_0 и $I_{Tг}$), и уменьшает объемного сопротивления области базы. Это влияет на ход прямой, и обратной ветви ВАХ.

1. Обратная ветвь ВАХ резко смещается вниз, т.к. **обратный ток резко возрастает с температурой.** Зависимость обратного тока от температуры аппроксимируется **выражением**

$$I_0(T) = I(T_0) 2^{(T-T_0)/T^*},$$

где: $I(T_0)$ -ток измерен при температуре T_0 ; T – текущая температура; T^* – температура удвоения обратного тока – (5-6)0С – для Si. и (9-10)0С – Ge. Максимально допустимое увеличение обратного тока диода определяет максимально допустимую температуру диода, которая составляет 80— 100 °С для германиевых диодов и 150 — 200 °С для кремниевых..

Ток утечки слабо зависят от температуры, но может существенно изменяться во времени. Он определяет временную нестабильность обратной ветви ВАХ.

2. Прямая ветвь ВАХ при увеличении температуры сдвигается влево и становится более крутой (рис. 3.3). Это объясняется ростом $I_{обр}$ и уменьшением r_b ,

Для оценки температурной нестабильности прямой ветви вводится температурный коэффициент напряжения (ТКН): $\alpha_T = \Delta U / \Delta T$, $\alpha_T \approx -2,3 \text{ мВ/}^\circ\text{С}$.

$$I_0(T) = I(T_0) 2^{(T-T_0)/T^*}$$

$T^* = (5-6)^\circ\text{С}$ – для Si
 $T^* = (9-10)^\circ\text{С}$ – для Ge

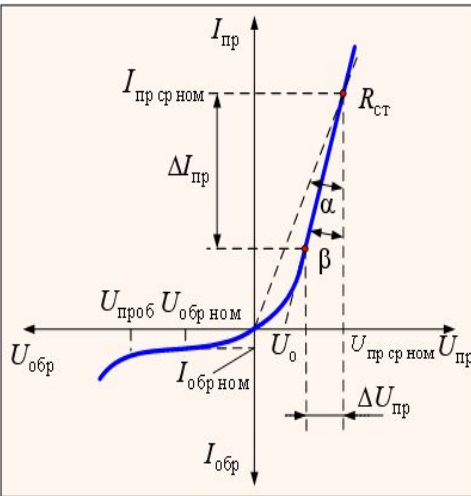
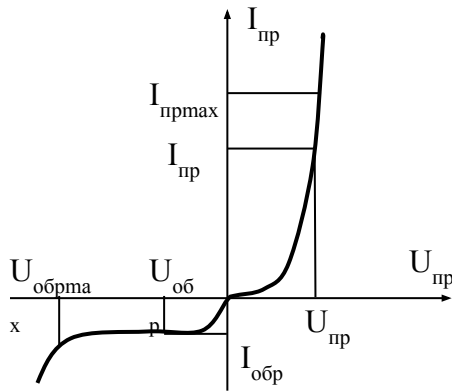
2.4. Выпрямительные диоды

Выпрямительные диоды – предназначены для выпрямления низкочастотного переменного тока и обычно используются в источниках питания. Под выпрямлением понимают преобразование двухполярного тока в однополярный. Для выпрямления используется основное свойство диодов – односторонняя проводимость.

В выпрямительных диодах используют плоскостные диоды. Они имеют большую площадь контакта p и n областей и большую барьерную емкость (емкостное сопротивление $X_c = 1/(\omega C)$, что не позволяет выпрямлять на высоких частотах. Кроме того такие диоды имеют большую величину обратного тока.

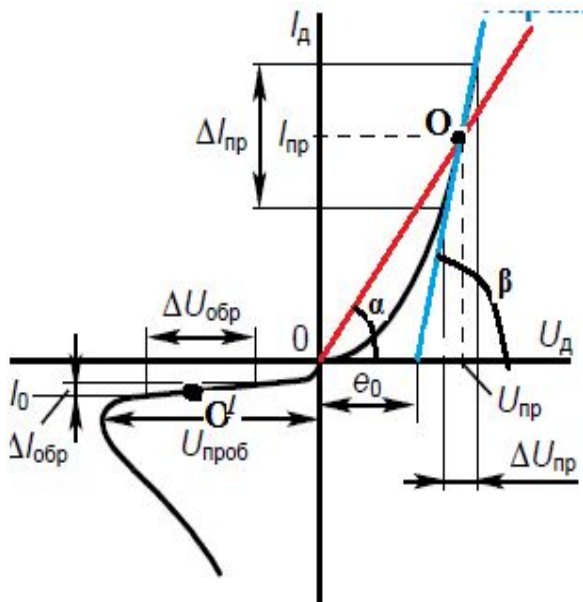
Основные предельные параметры выпрямительных диодов:

- **Максимально допустимый выпрямленный ток** $I_{вп. ср max}$ — средний за период ток через диод (постоянная составляющая), при котором обеспечивается его надежная длительная работа.
- **Среднее прямое напряжение** $U_{пр. ср}$ — среднее за период прямое напряжение на диоде при протекании через него максимально допустимого выпрямленного тока. ($U_{пр} \approx 0.3...0,7$ В для Ge-диодов и $U_{пр} \approx 0,8...1,2$ В - для Si)
- **Средний обратный ток** $I_{обр. ср}$ — средний за период обратный ток, измеряемый при максимальном обратном напряжении.
- **Максимально допустимое обратное напряжение** $U_{обр. max}$ ($U_{обр. и max}$) — наибольшее постоянное (или импульсное) обратное напряжение, при котором диод может длительно и надежно работать.
- **Максимальная частота** f_{max} — наибольшая частота подводимого напряжения/, при которой выпрямитель на данном диоде работает достаточно эффективно.
- **Рассеиваемая мощность** $P_{ср}$ — среднее значение рассеиваемой мощности за период.
- Коэффициент выпрямления $= I_{пр} / I_{обр}$



- рабочий диапазон температур (германиевые диоды работают в диапазоне $-60...+70^{\circ}\text{C}$, кремниевые $-60...+150^{\circ}\text{C}$,).
- Улучшая условия охлаждения (вентиляция, радиаторы), можно увеличить отводимую мощность и избежать теплового пробоя. Применение радиаторов позволяет увеличить прямой ток

Параметры выпрямительных диодов



$$R_{ст} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} = \operatorname{tg} \alpha$$

$$R_{дин} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}} = \operatorname{tg} \beta$$

При анализе электронных цепей с диодами используются следующие параметры:

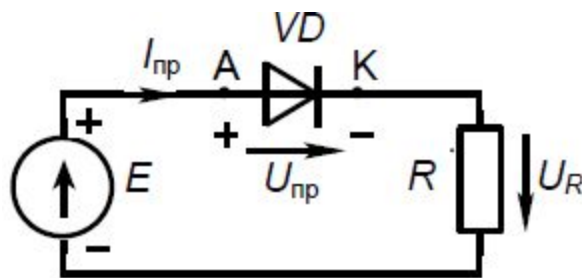
- e_0 – напряжение отсечки («пятка ВАХ»);
- I_0 – тепловой ток, протекающий через запертый p-n-переход;
- **Uпроб** – напряжение пробоя – обратное напряжение, при котором происходит электрический пробой p-n-перехода;
- **Статическое сопротивление диода:** $R_{ст} = U/I$, где I и U – величина тока и напряжения на диоде для точки O.
- **Дифференциальное сопротивление:** $R_{дин} = \Delta U / \Delta I$, где ΔU и ΔI – приращение тока и напряжения диода в заданной рабочей точке O.

Типовые значения параметров диода (ЗНАТЬ!)

- Uпр тип = 0,7В – Si; Uпр тип = 0,35В – Ge.
- $e_0 = 0,4 \div 0,6$ В – Si; $e_0 = 0,2 \div 0,3$ В – Ge.
- $r_{пр} =$ десятки \div сотни Ом – Si; $r_{пр} =$ десятки \div 50 Ом – Ge.
- $I_0 =$ десятки \div сотни мкА; I_0 Ge $\approx 10 \cdot I_0$ Si.
- $r_{обр} =$ сотни МОм – Si; $r_{обр} =$ единицы МОм – Ge.

Типовая задача на диоды: Определить режим работы диода по постоянному току (I_d и U_d)

1. Включение диода в прямом направлении



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

Составляется уравнение по 2-му закону Кирхгофа:

1. $E = I_d \cdot R + U_d$ - уравнение нагрузочной прямой и

2. $I_d = F(U_d)$ - ВАХ диода

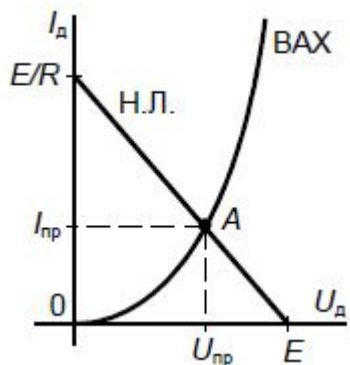
Нагрузочная прямая (линия) строится по двум точкам:

$$U_d = E - I_d \cdot R \quad 1. U_d = 0; I_d = E/R;$$

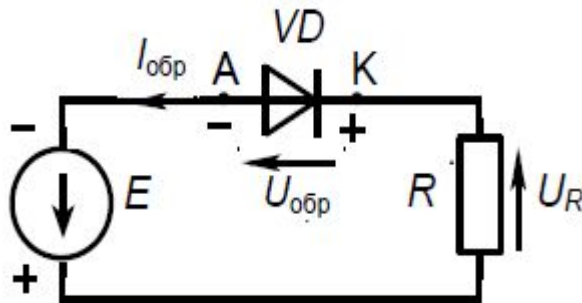
$$2. I_d = 0; U_d = E.$$

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

Чтобы диод не выгорел необходимо **обеспечить**
 $I_d < I_{d.пр.макс}$



2. Включение диода в обратном направлении



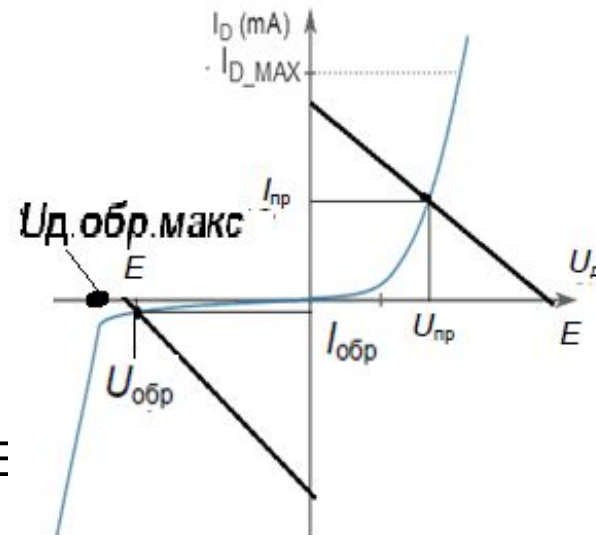
По 2-му закону Кирхгофа для данной цепи:

$$E = I_d \cdot R + U_d, \text{ -НП}$$

$$U_d = 0; I_d = -E/R;$$

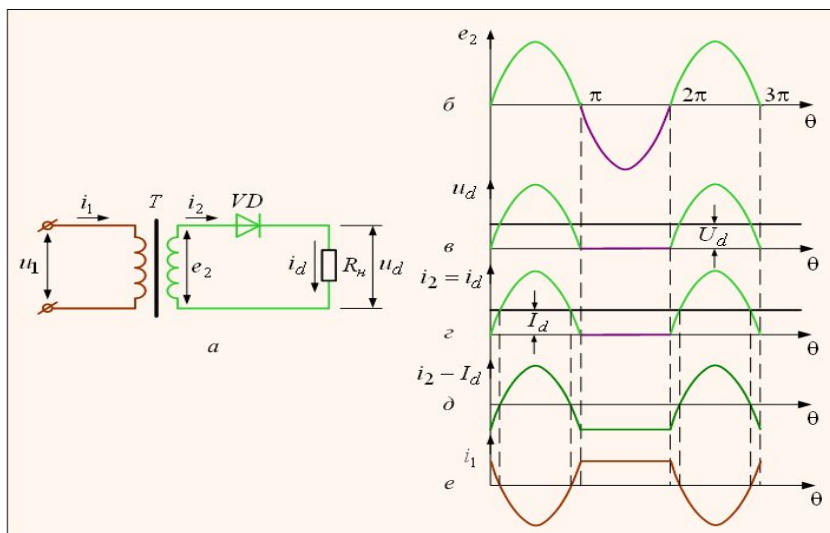
$$I_d = 0; U_d = -E.$$

$$I_d = I_{обр} = 0, U_d = U_d = U_{обр} = -E$$



Внешнее запирающее напряжение на диоде должно быть меньше предельно-допустимого обратного напряжения): $U_{обр} < U_{d.обр.макс}$

Применение выпрямительных полупроводниковых диодов



Промышленностью выпускаются кремниевые выпрямительные диоды на токи до сотен ампер и обратные напряжения до тысяч вольт. Если необходимо работать при обратных напряжениях, превышающих допустимые $U_{обр}$ для одного диода, то диоды соединяют последовательно. Для увеличения выпрямленного тока можно применяться параллельное включение диодов.

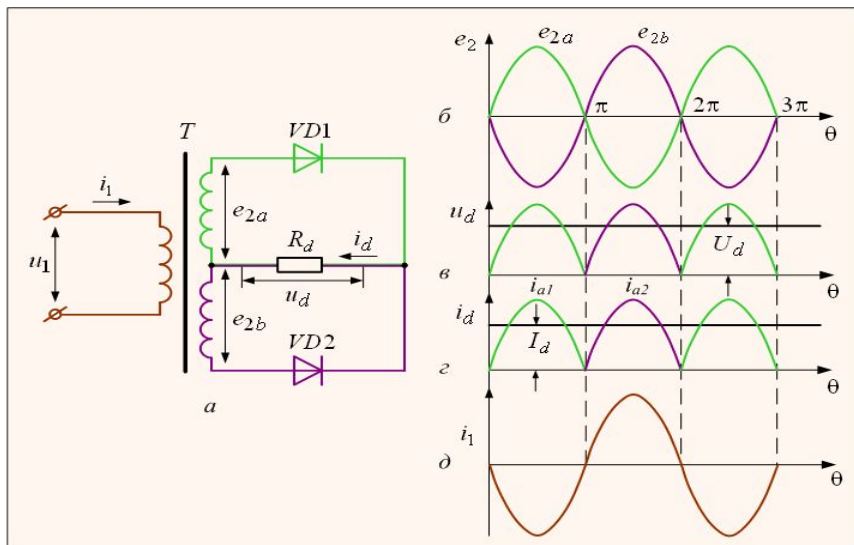
1) Однополупериодный выпрямитель. Трансформатор служит для понижения амплитуды переменного напряжения. Диод служит для выпрямления переменного тока.

2) Двухполупериодный выпрямитель. Предыдущая схема имеет существенный недостаток. Он состоит в том, что не используется часть энергии первичного источника питания (отрицательный полупериод). Недостаток устраняется в схеме двухполупериодного выпрямителя.

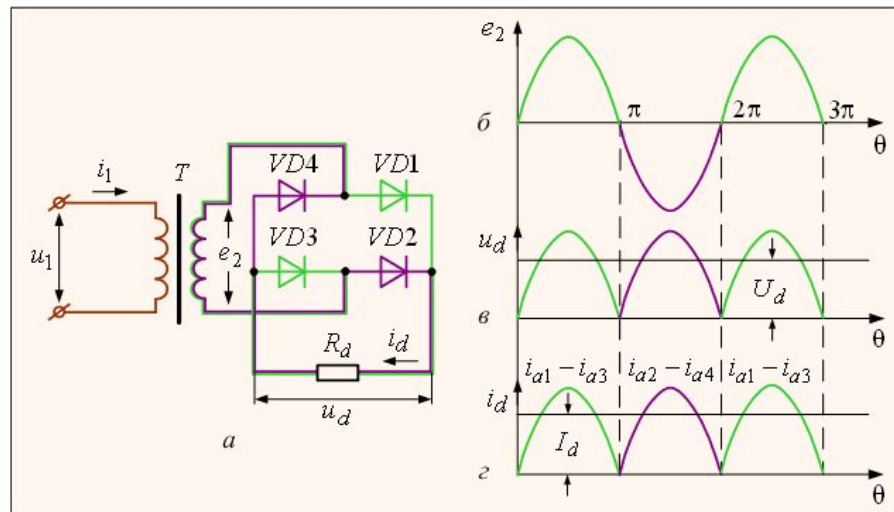
В первый положительный (+) полупериод, ток протекает так : +, VD3, Rн↓, VD2, - .

Во второй – отрицательный (-) так: +, VD4, Rн↓, VD1, - . В обоих случаях он через нагрузку протекает в одном направлении ↓- сверху вниз, т.е. происходит выпрямление тока.

Однофазный однополупериодный выпрямитель



Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой



Однофазный мостовой выпрямитель

2.5. Импульсные диоды

Импульсные диоды – это диоды, которые предназначены для работы в ключевом режиме в импульсных схемах. Электрический ключ имеет два состояния:

1. Замкнутое, сопротивление равно нулю $R_{vd} = 0$. 2. Разомкнутое, сопротивление бесконечно $R_{vd} = \infty$. Этим требованиям удовлетворяют диоды в зависимости от полярности приложенного напряжения.

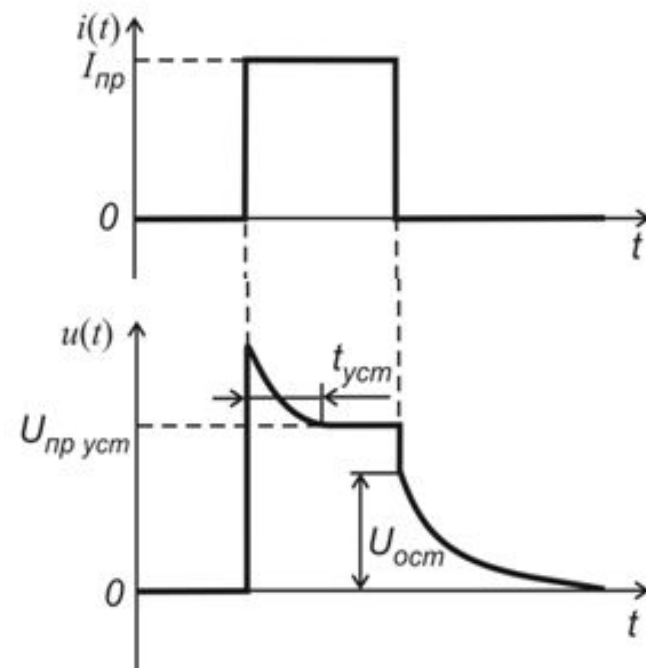
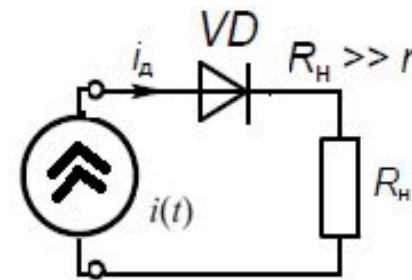
Важным параметром импульсных диодов является их скорость (время) переключения. Оно ограничено:

а) ёмкость диода. б) скорость диффузии и связанные с ней время накопления и рассасывания неосновных носителей заряда.

В импульсных диодах ёмкости диода уменьшают уменьшением площади р-п-перехода. Однако, это уменьшает величину максимального прямого тока диода.

Параметры характеризующие быстродействие переключения.:

1. **Время установления прямого напряжения на диоде ($t_{уст}$)** – время, за которое напряжение на диоде при включении прямого тока достигает своего стационарного значения с заданной точностью. Оно связано с накопления в базе неосновных носителей заряда инжектируемых эмиттером, которые снижает прямое сопротивление диода.



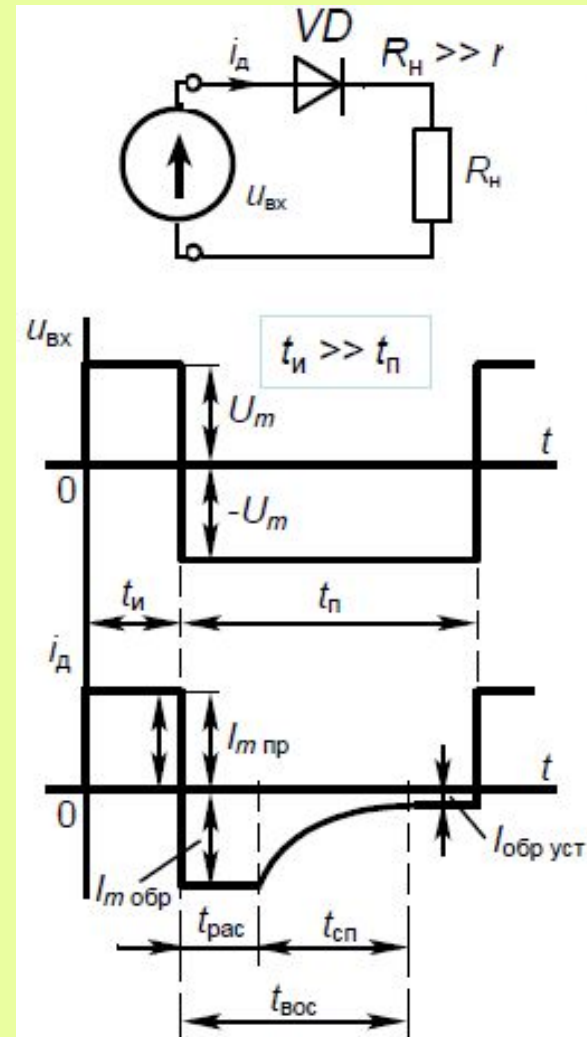
Импульсные диоды

2. Время восстановления обратного сопротивления диода ($t_{восст.}$) - время, в течение которого обратный ток диода после переключения полярности приложенного напряжения с прямого на обратное достигает своего стационарного значения с заданной точностью. Оно связано с рассасыванием из базы неосновных носителей заряда накопленных при протекании прямого тока..

$$t_{восст.} = t_{рас} + t_{сп.},$$

где $t_{рас}$ – время за которое концентрация неосновных носителей заряда на границе р-п-перехода обращается в ноль,

$t_{сп.}$ – время разряда диффузионной емкости, связанное с рассасыванием неосновных зарядов в объеме базы диода. В целом время восстановления это время выключения диода, как ключа.

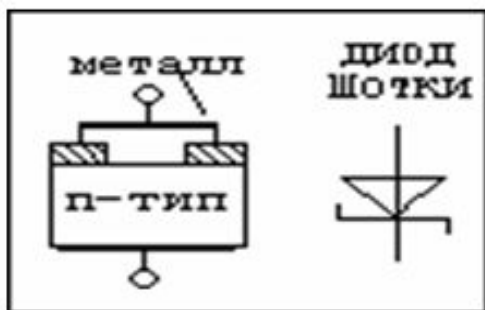


Для уменьшения $t_{восст}$ необходимо уменьшить объем полупроводниковой структуры и увеличить скорость рекомбинации неосновных носителей, что достигается технологией изготовления импульсных диодов: введением в исходный материал нейтральных примесей, чаще всего золота (Au), для создания так называемых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

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 ток;
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.

2.6. Диоды Шоттки

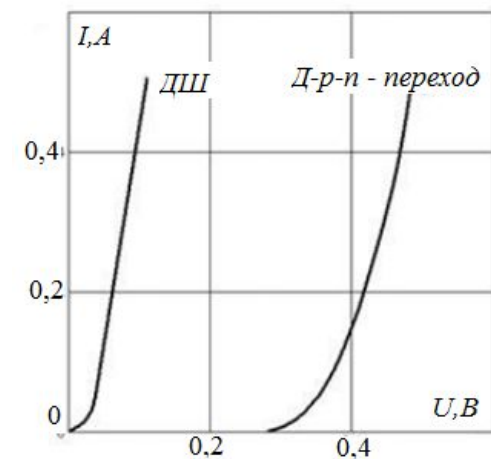
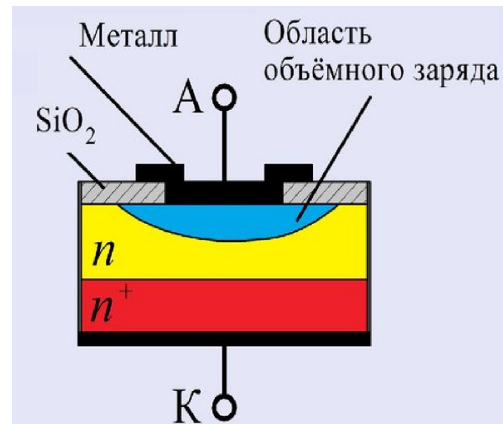


Электрический переход, возникающий на границе металл – полупроводник, при определенных условиях обладает выпрямительными свойствами. Переход создается путём напыления металла на высокоомный полупроводник, например, n-типа. Приборы на основе такого перехода называются диодами Шоттки.

Главная особенность этого диода – отсутствие неосновных носителей заряда в процессе его работы. Прямой ток обусловлен электронами, движущимися из кремния в металл. Следовательно, практически отсутствуют процессы их накопления и рассасывания, а потому диоды Шоттки имеют высокое быстродействие переключения.

Другой особенностью этих диодов является малое (по сравнению с обычными кремниевыми диодами) прямое напряжение, составляющее около 0,3 В. Это связано с тем, что тепловой ток примерно на три порядка превышает ток p-n-перехода.

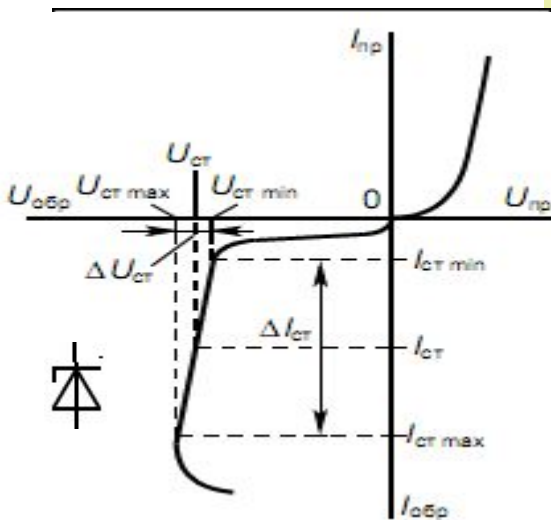
Диоды Шоттки применяются в низковольтных выпрямителях, в качестве импульсных диодов, и в цифровых интегральных схемах в комбинации с транзисторами. Такие транзисторы называются транзисторами Шоттки – они имеют высокое быстродействие переключения.



Достоинства диодов Шоттки: 1. высокое быстродействие переключения ; 2. малое прямое напряжение $\approx 0,15 \div 0,3V$.

Недостатки: 1. сравнительно небольшое обратное напряжение ($U_{обр} < 250V$) , 2. большие обратные токи.

2.7. Стабилитроны и стабисторы



Стабилитрон – это полупроводниковый диод, изготовленный из слабо легированного кремния, который применяется для стабилизации постоянного напряжения. ВАХ стабилитрона при обратном смещении имеет участок малой зависимости напряжения от тока протекающего через него. Этот участок возникает за счёт электрического пробоя (рис. 1.5).

Стабилитрон характеризуется следующими параметрами:

Номинальное напряжение стабилизации $U_{ст. ном}$ — номинальное напряжение на стабилитроне при заданном токе стабилизации;

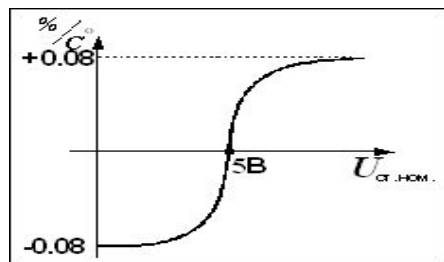
номинальный ток стабилизации $I_{ст. ном}$ – ток через стабилитрон при номинальном напряжении стабилизации;

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: $R_{ст} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$.

ТКН – температурный коэффициент напряжения стабилизации:



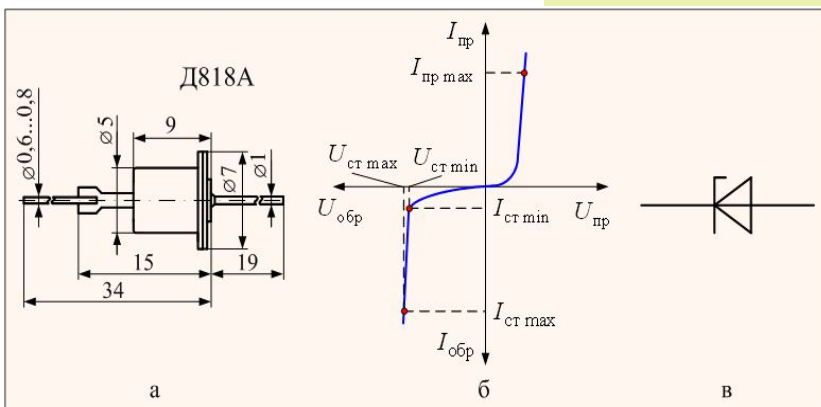
$$ТКН = \frac{\Delta U_{ст. ном.}}{U_{ст. ном.}} \cdot 100\% \cdot \Delta T$$

– относительное изменение напряжения на стабилитроне приведённое к одному градусу.

$U_{ст. ном.} < 5В$ – при туннельном пробое.

$U_{ст. ном.} > 5В$ – при лавинном пробое.

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}** .



Параметрический стабилизатор напряжения

обеспечивает постоянство напряжения на нагрузке (U_n) при изменении постоянного напряжения питания ($U_{пит}$) или сопротивления нагрузки (R_n).

Проведем анализ работы схемы.

По второму закону : $U_{пит} = (I_{VD} + I_n) R_{огр} + U_n$

Запишем это уравнение относительно приращений:

$$\Delta U_{пит} = (\Delta U_n / r_{ст} + \Delta U_n / R_n) R_{огр} + \Delta U_n$$

Разрешим его относительно ΔU_n , получим

$$\Delta U_n = \Delta U_n / [1 + R_{огр} / r_{ст} + R_{огр} / R_n.]$$

Чем больше $R_{огр} / r_{ст}$ и меньше $r_{ст}$ тем меньше изменения выходного напряжения.

Расчёт схемы (обычно задано $U_{пит.}$ и R_n):

1. Выбор стабилитрона VD : $I_{ст.ном} = U_n$, $I_{ст.ном} > I_n + I_{ст.мин.}$

2. Расчет

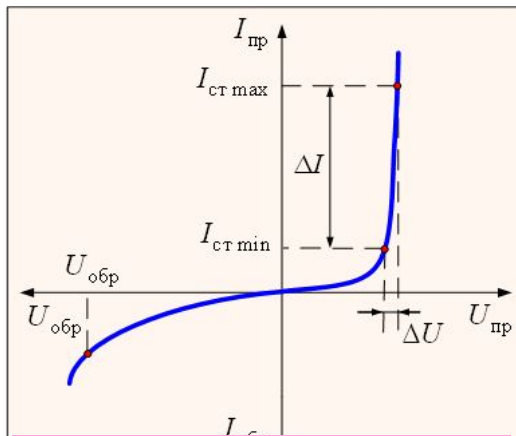
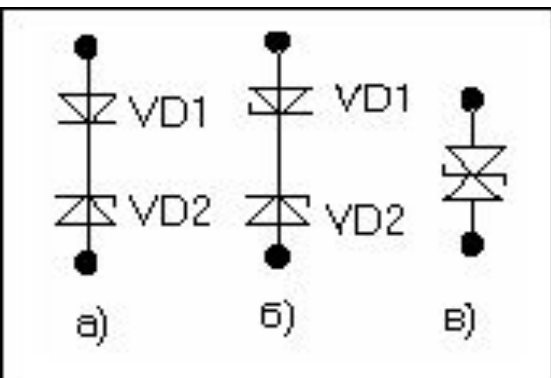
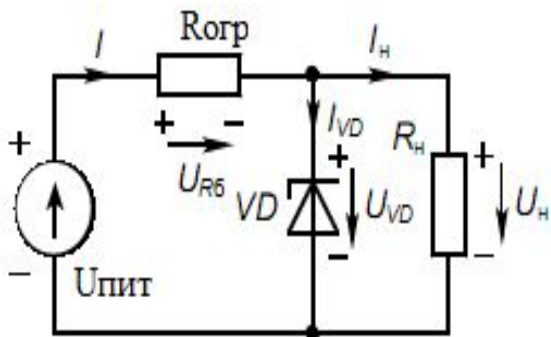
$$R_{огр.} = \frac{U_{вх.} - U_{ст.ном.}}{I_{ст.ном.}}$$

Разновидности стабилитронов:

1. Прецизионные. Они имеют малое значение ТКН и нормированную величину $I_{ст. ном.}$. Малое ТКН достигается путем включения последовательно со стабилитроном (VD2), имеющим положительный ТКН диоды (VD1) в прямом направлении, ТКН которого отрицателен. Поскольку общий ТКН равен их сумме, то он **оказывается малым по величине.**

2. Двуханодный стабилитрон. Он состоит из двух стабилитронов включенных встречно-последовательно и применяется для стабилизации амплитуды переменных напряжений.

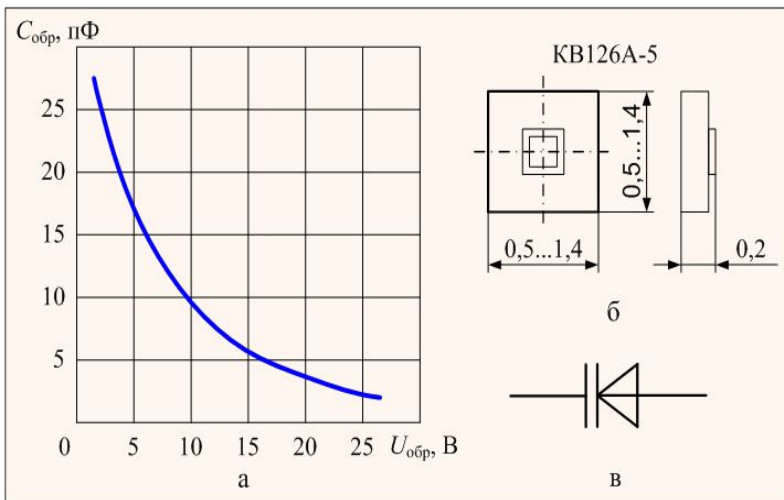
3. Стабисторы – это полупроводниковые диоды в которых для стабилизации напряжения используется прямая ветвь ВАХ. В таких диодах база сильно легирована примесями ($r_{б} \rightarrow 0$), а потому их прямая ветвь практически идет вертикально. Параметры стабистора аналогичны параметрам стабилитрона. Они применяются для стабилизации малых напряжений ($U_{ст.ном.} \approx 0.6V$)., ток стабисторов – от 1мА до нескольких десятков мА и отрицательный ТКН.



ВАХ стабистора

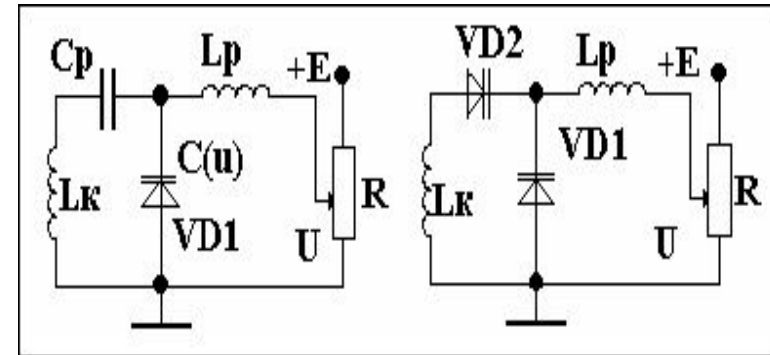
Варикапы

Варикап – это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость барьерной емкости $p-n$ -перехода от обратного напряжения.



$$C_{бар.} = C_0 \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U} \right)^\nu$$

$$C_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S_{p-n}}{l_{p-n}}$$



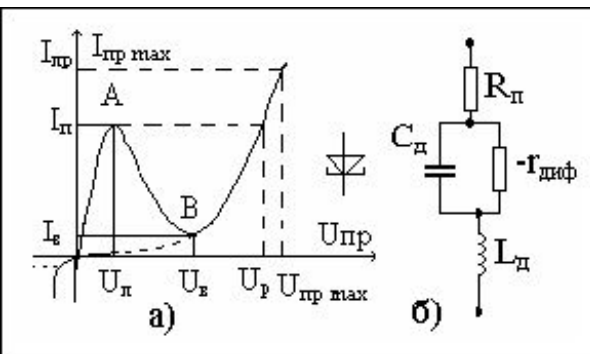
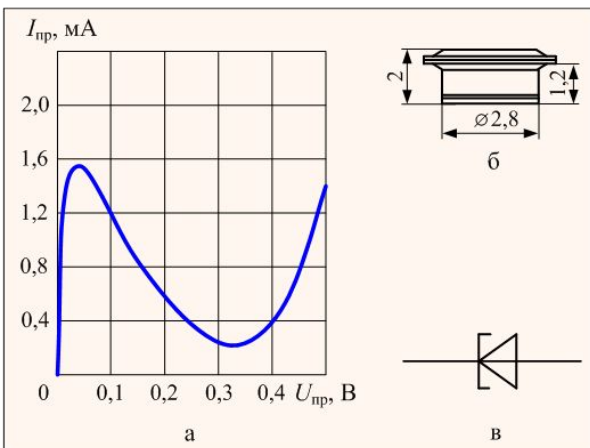
Основные параметры варикапов:

- 1. Номинальная ёмкость** – C_v - ёмкость между выводами, измеренная при заданном обратном напряжении ($C_v < 200$ пФ)
- 2. Добротность варикапа** – Q - отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте к сопротивлению потерь при заданной ёмкости или обратном напряжении;
- 3. Коэффициент перекрытия по ёмкости K_p** – отношение максимальной ёмкости варикапа к его минимальной ёмкости при двух заданных значениях обратного напряжения. ($K_p = 8 - 10$)
- 4. Температурный коэффициент ёмкости α** – относительное изменение ёмкости варикапа, приходящееся на один градус изменения температуры окружающей среды:

В электронике варикапы применяют для электронной перестройке резонансной частоты колебательных контуров. Рассмотрим две схемы.

2.9. Туннельные и обращенные диоды

Туннельный эффект возникает на границе сильнолегированных (вырожденных) p-n структур с концентрацией примеси $\sim 10^{21}$.



Он проявляется в том, что на прямой ветви ВАХ появляется спадающий участок АВ с отрицательным сопротивлением $R_{диф} = \Delta U / \Delta I|_{AB} < 0$.

Пунктиром на графике показана ВАХ диода.

Это позволяет использовать такой диод в усилителях и генераторах электрических сигналов в диапазоне СВЧ, а также в импульсных устройствах.

При обратном смещении ток из-за туннельного пробоя резко возрастает при малых напряжениях.

Основные параметры туннельного диода следующие:

- 1. пиковый ток и напряжение пика $I_{п}, U_{п}$** — ток и напряжение в точке А;
- 2. ток и напряжение впадины $I_{в}$** — ток и напряжение в точке В;
- 3. отношение токов $I_{п}/I_{в}$** ; Для туннельных диодов из арсенида галлия $I_{п}/I_{в} > 10$, для германиевых туннельных диодов $I_{п}/I_{в} = 3 \dots 6$.
- 4. напряжение раствора $U_{р}$** — прямое напряжение, большее напряжения впадины, при котором ток равен пиковому;

индуктивность $L_{д}$ — полная последовательная индуктивность диода при заданных условиях;

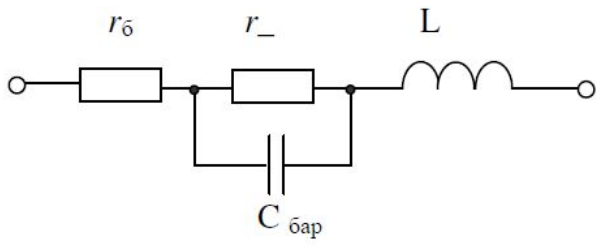
дифференциальное сопротивление $r_{диф}$ — величина, обратная крутизне ВАХ;

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 fR — расчетная частота, при которой активная составляющая полного сопротивления последовательной цепи, состоящей из p-n-перехода и сопротивления потерь, обращается в нуль;

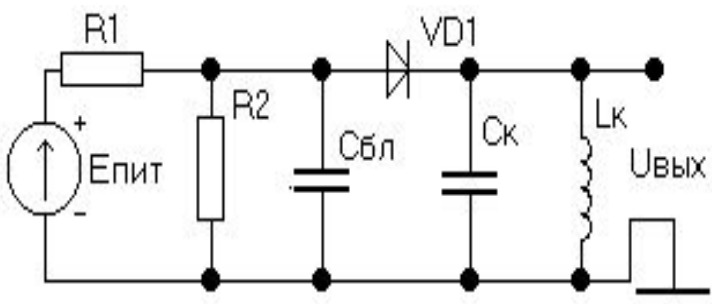
шумовая постоянная туннельного диода $K_{ш}$ — величина, определяющая коэффициент шума диода; *сопротивление потерь туннельного диода $R_{п}$* — суммарное сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов.

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

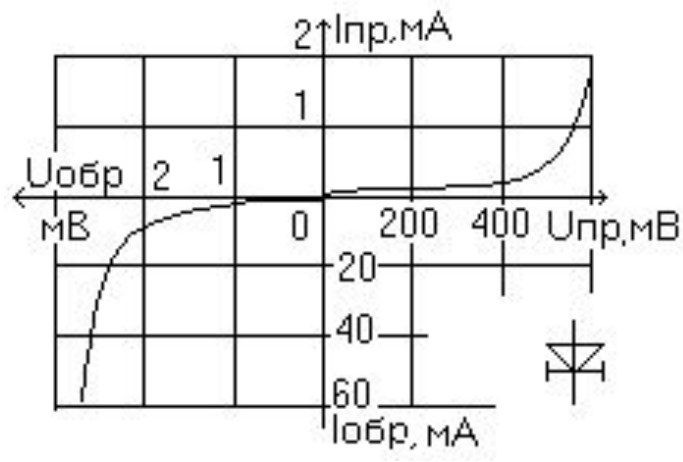


1. Схема замещения ТД.

2. Схема генератора гармонических колебаний на ТД приведена на рис. . Назначение элементов: R1, R2 – резисторы, задают рабочую точку туннельного диода на середине участка ВАХ с отрицательным сопротивлением; Lk, Ck – колебательный контур; Cбл – ёмкость блокировочная, по переменной составляющей она подключает туннельный диод параллельно к колебательному контуру.



Туннельный диод, включённый параллельно колебательному контуру компенсирует своим отрицательным сопротивлением сопротивление потерь колебательного контура, а потому колебания в нем могут продолжаться бесконечно долго.



Обращенные диоды

являются разновидностью туннельных диодов. В них концентрация примесей несколько меньше чем в туннельных. За счет этого у них отсутствует участок с отрицательным сопротивлением. На прямой ветви до напряжений 0,3-0,4В имеется практически горизонтальный участок с малым прямым током (рис. .), в то время как ток обратной ветви начиная с малых напряжений, за счет туннельного пробоя, резко возрастает. В этих диодах, для малых переменных сигналов, прямую ветвь можно считать не проводящей ток, а обратную – проводящей. Отсюда и название этих диодов.

Обращенные диоды используются для выпрямления СВЧ сигналов малых амплитуд (100-300)мВ.

2.10. Маркировка полупроводниковых диодов

Маркировка состоит из шести элементов, например:

К Д 2 1 7 А или К С 1 9 1 Е
1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6

1 - Буква или цифра, указывает вид материала, из которого изготовлен диод:

1 или Г – Ge (германий); 2 или К – Si (кремний); 3 или А – GeAs.

2 - буква, указывает тип диода по его функциональному назначению:

Д – диод; С – стабилитрон, стабистор; В – варикап; И – туннельный диод; А – СВЧ диоды.

3. Назначение и электрические свойства.

4 и 5 - указывают порядковый номер разработки или электрические свойства (в стабилитронах – это напряжение стабилизации; в диодах – порядковый номер).

6. - Буква, указывает деление диодов по параметрическим группам (в выпрямительных диодах – деление по параметру $U_{обр.мах}$, в стабилитронах деление по ТКН).



Дисциплина:

Физические основы электроники

Лектор: Погодин Дмитрий Вадимович
Кандидат технических наук,
доцент кафедры РИИТ
(кафедра Радиоэлектроники и
информационно-измерительной
техники)

