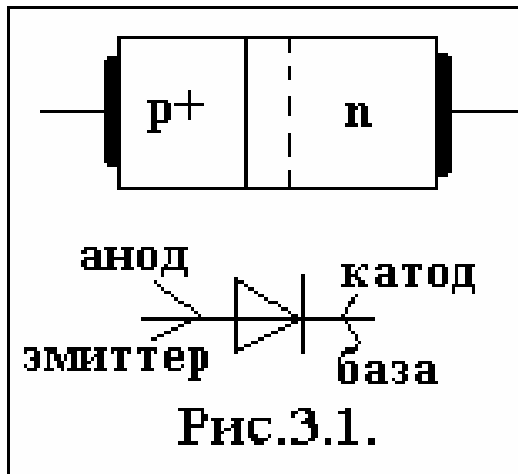


# Полупроводниковые диоды



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 ( $p+$ ) высоколегированная и называется эмиттер, другая ( $n$ ) - слаболегированная - база.  $P-n$ -переход, в основном, размещается в базе т.к она слаболегирована.

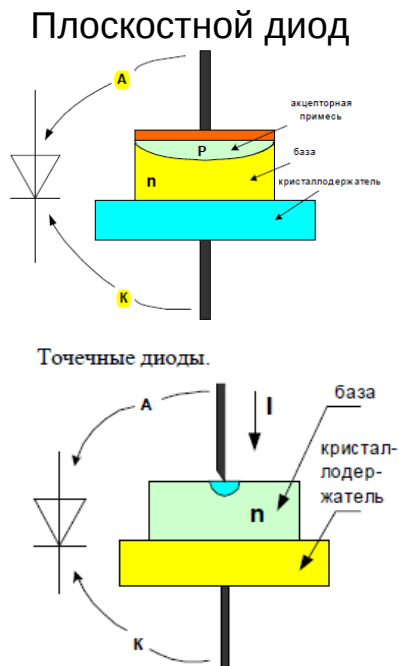
Структура, условное обозначение и название выводов показаны на рис. 3.1. Между каждой внешней областью полупроводника и ее выводом имеется омический контакт, который на рис. 3.1 показан жирной чертой.

## Классификация диодов.

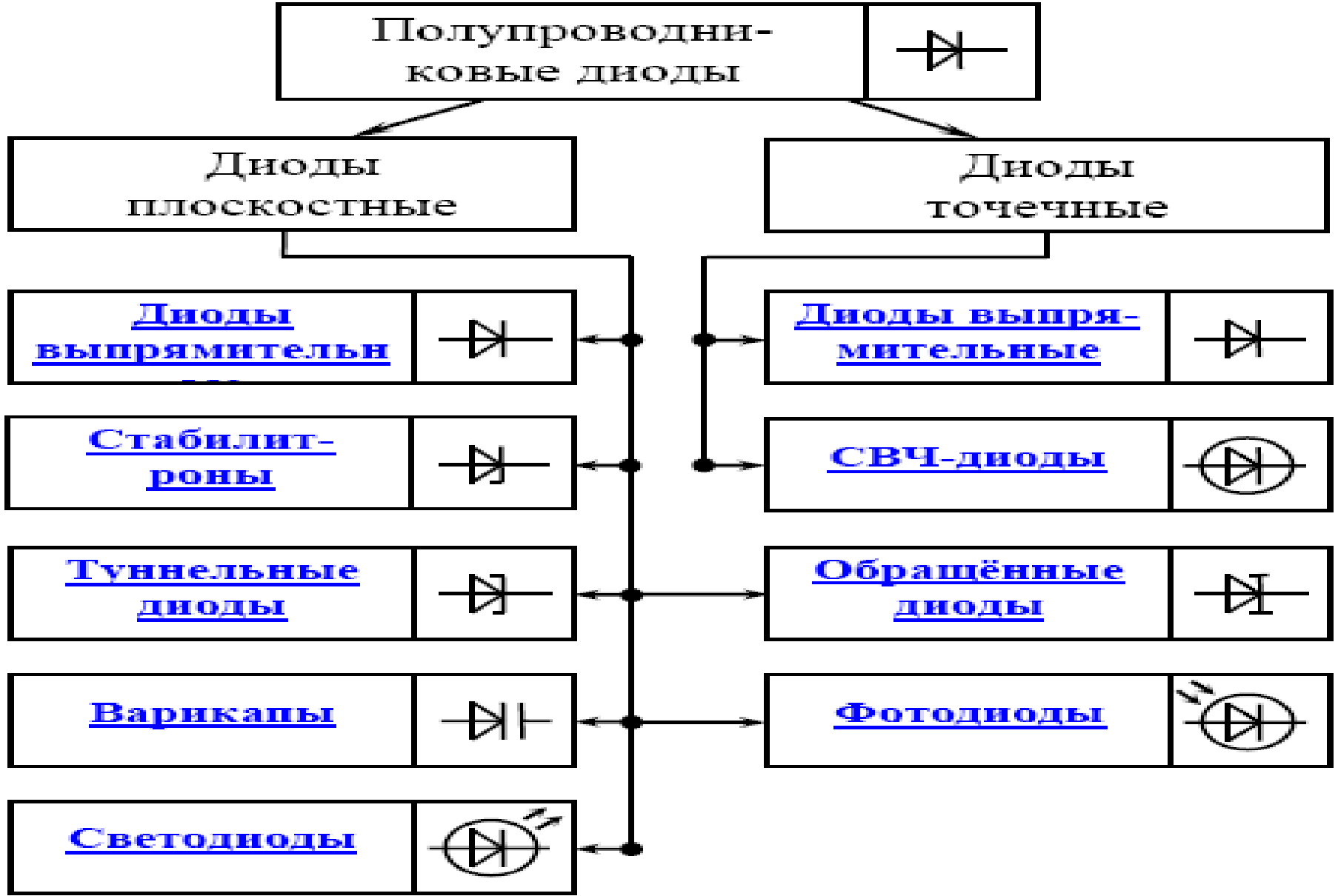
1. В зависимости от геометрических размеров  $p-n$ -переходов различают: точечные и плоскостные.

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 стабисторы, варикапы, туннельные и обращенные, а также СВЧ-диоды и др.



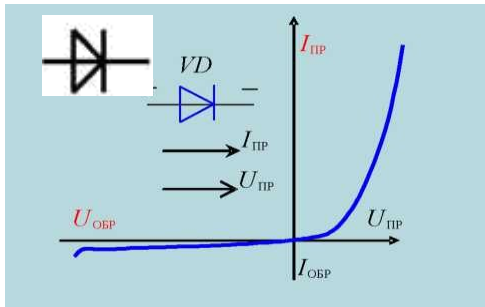
# Классификация диодов по функциональному назначению и их УГО



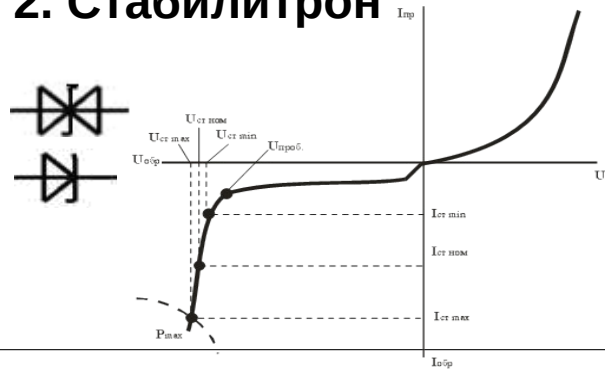
# Классификация диодов по функциональному назначению

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,..).

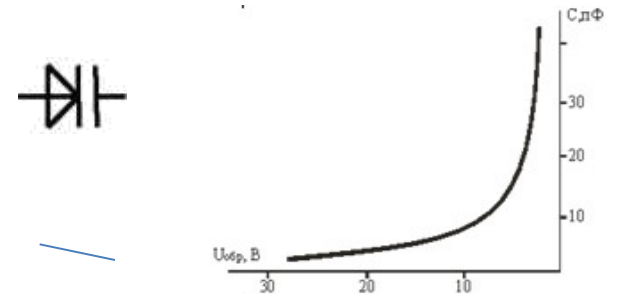
## 1. Выпрямительный диод



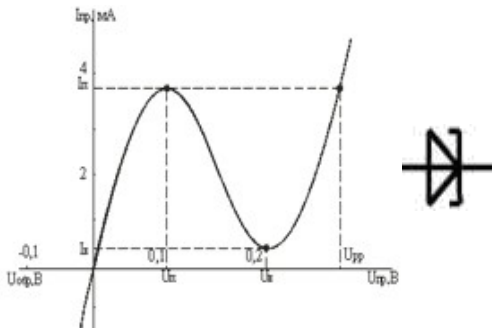
## 2. Стабилитрон



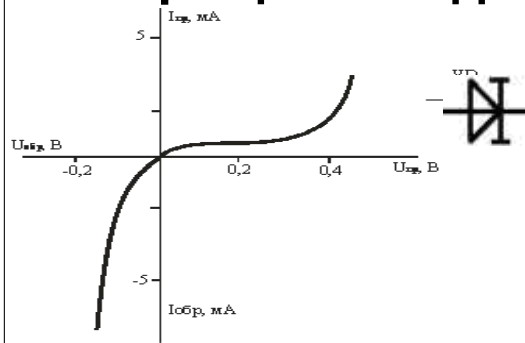
## 3. Варикап



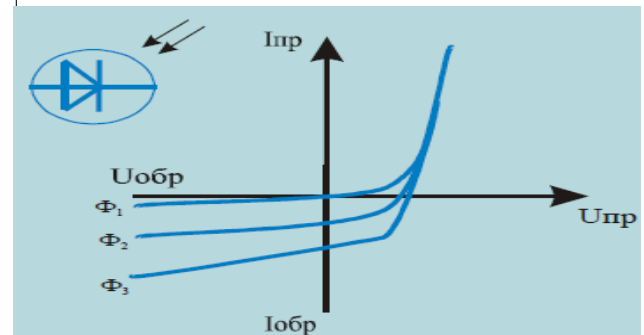
## 4. Туннельный диод



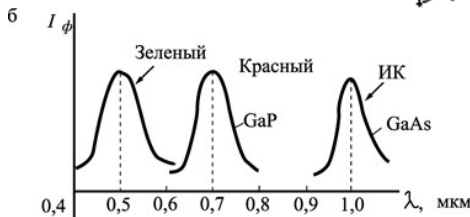
## 5. Обращенный диод



## 6. Фотодиод



## 7. Светодиод

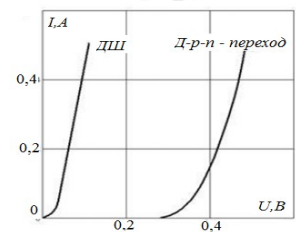
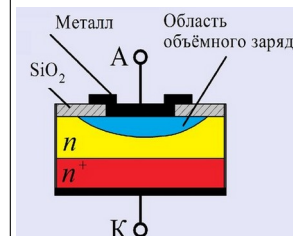


## 8. СВЧ диоды



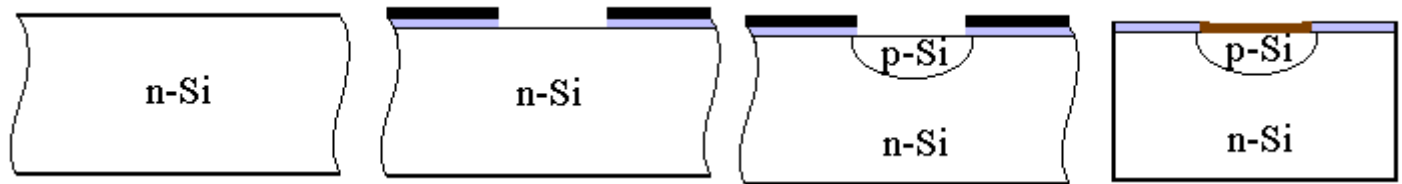
К числу самых распространённых видов СВЧ диодов относят:  
 Лавинно-пролётный (диоды Р-I-N диод;  
Диод Ганна;  
 Точечно-контактный диод;  
Диод Шоттки или Мотта

## 9. Диоды Шоттки

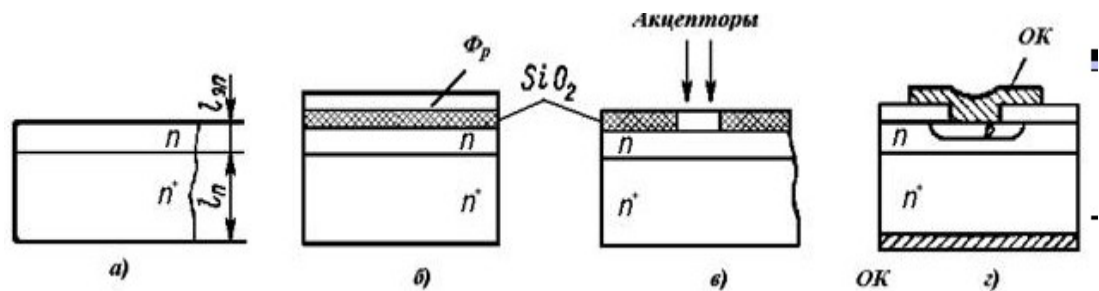


# Классификация диодов по технологии изготовления диодов

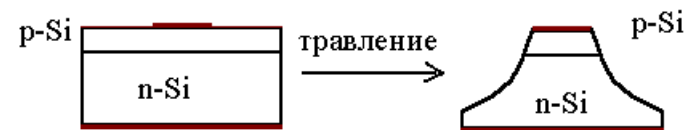
## 1. Планарная технология



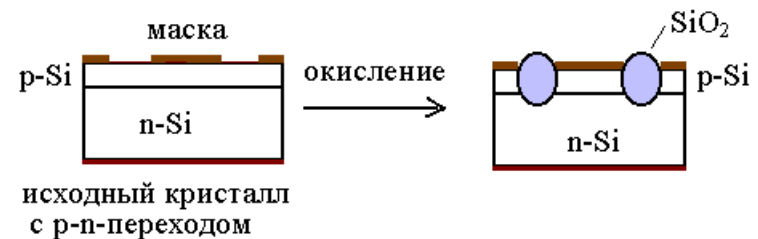
2. планарная эпитаксиальная и эпитаксиально-диффузионная технологии (Эпитаксиальная технология позволяет получать переходы с малой толщиной базы).



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

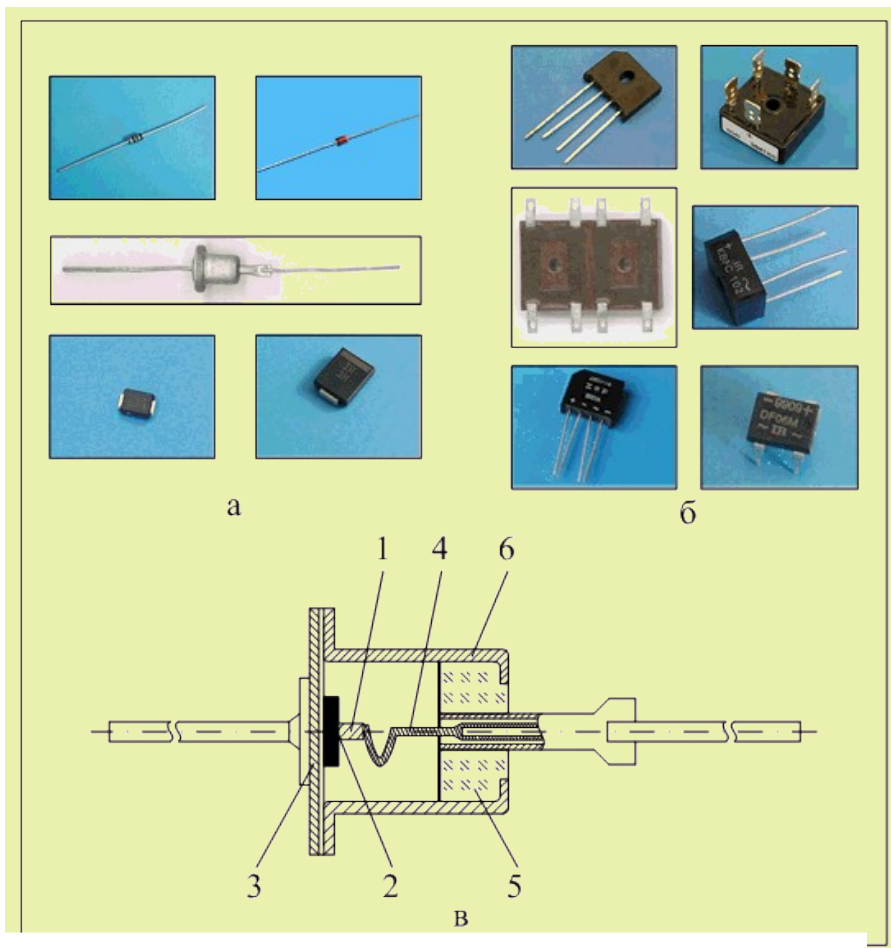


Рис. 2.4. Выпрямительные диоды маломощные диоды: дискретное исполнение (а); диодные мосты (б) и конструкция одного из маломощных диодов (в)

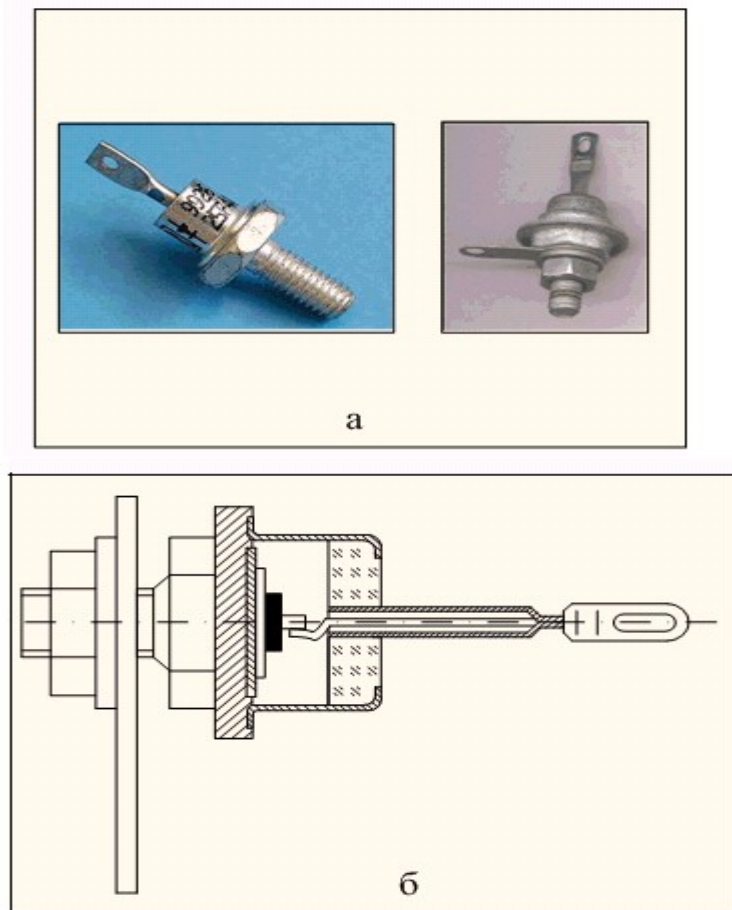
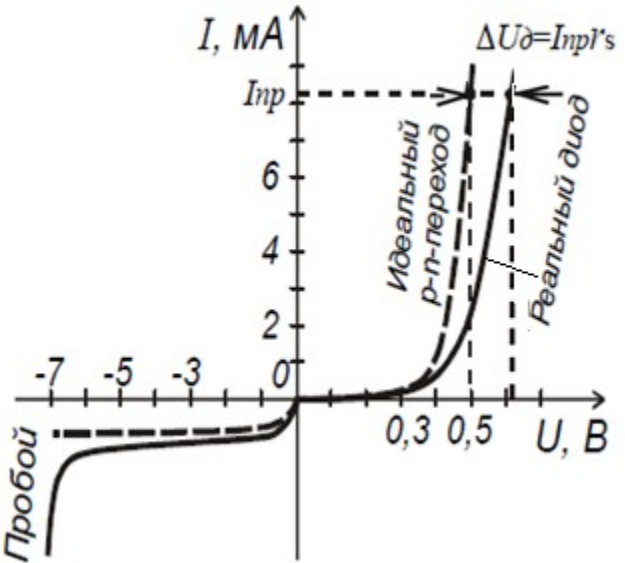


Рис. 2.5. Общий вид (а) и конструкция (б) мощного кремниевого выпрямительного диода



# 2.1. Вольт-амперная характеристика диода



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

**При прямом смещении** ВАХ диода сдвигается вправо (2) и почти линейно зависит от напряжения. Это связано с учетом объемное сопротивление областей базы  $r_6$  и эмиттера  $r_3$  диода, обычно  $r_6 \gg r_3$ .

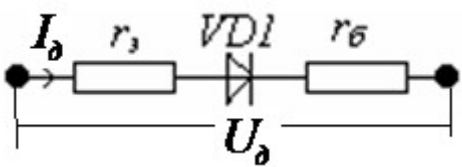
**При обратном смещении** диода ток диода не остается постоянным равным  $I_0$ , он возрастает т.к. обратный ток диода состоит из трех составляющих:

$$I_{обр} = I_0 + I_{тг} + I_{ут}$$

1.  $I_0$  - тепловой ток перехода - не зависит от  $U_{обр}$ ;
2.  $I_{тг}$  - ток термогенерации. Он возрастает с увеличением  $U_{обр}$ . 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  $I_0$ .
3.  $I_{ут}$  - 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.

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



$$I = I_0 \left( e^{\frac{U - I r_6}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (2)$$

$$U_\delta = \varphi_T \ln \left( \frac{I_\delta}{I_{0\delta}} + 1 \right) + R_6(I) \cdot I_\delta$$

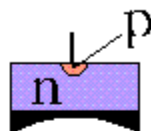
# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ (VD)

СТРУКТУРА

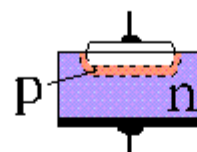


ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА

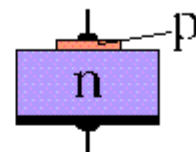
ТОЧЕЧНОГО ДИОДА



ПЛОСКОСТНОГО ДИОДА



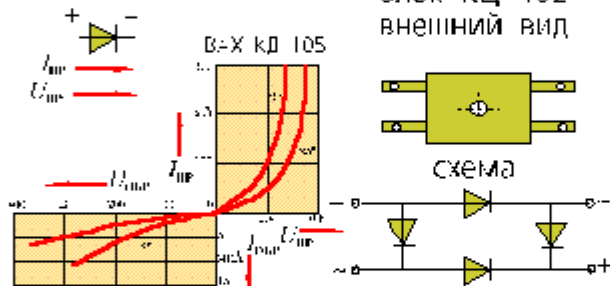
сплавной



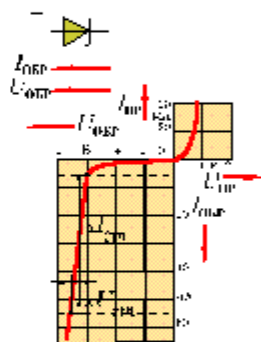
диффузионный

## ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

выпрямительный блок КЦ 402  
внешний вид



## СТАБИЛИТРОНЫ



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

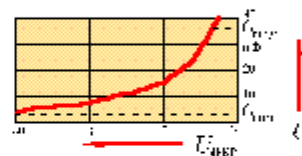
$$\gamma_{КС} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T} \approx 100\%$$

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

## ВАРИКАПЫ



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

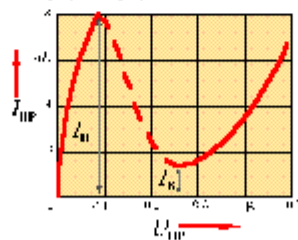


$$K_c = \frac{C_{max}}{C_{min}}$$

-коэффициент перекрытия емкости (5 ... 20)

## ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

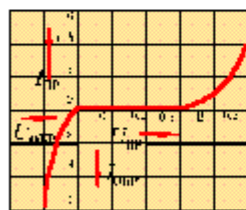
$I_{п}$  - ток пика  
 $I_{в}$  - ток впадины  
 $I_{п}/I_{в} = (5 \dots 20)$



## ОБРАЩЕННЫЕ ДИОДЫ



$I_{обр} = 0$  при  $U_{обр} < 0,3 В$



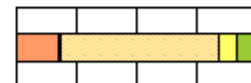
## СВЕТОДИОДЫ



внешний вид светодиода АЛ316



$I_{пр}$  через p-n переход, красное свечение



$I_{пр}$  через p-n переход, зеленое свечение

**К Д 104 А**

СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ ДИОДОВ ПО ГОСТ - 113369-19-81

разновидность данного типа диодов

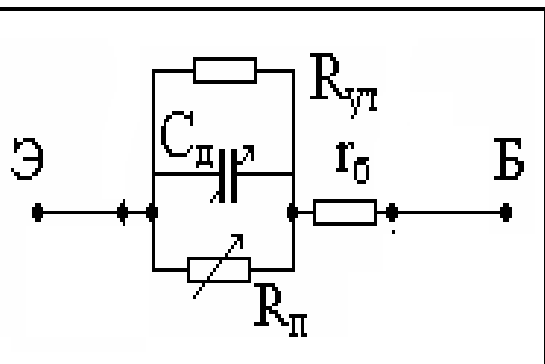
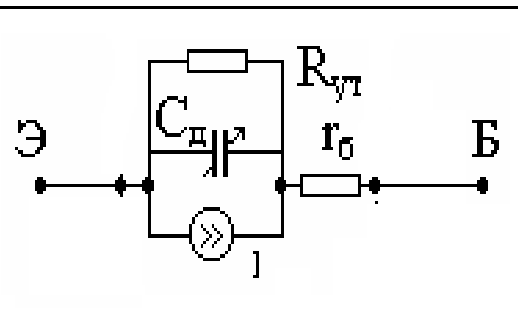
порядковые номера разработки технологического типа диода

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,

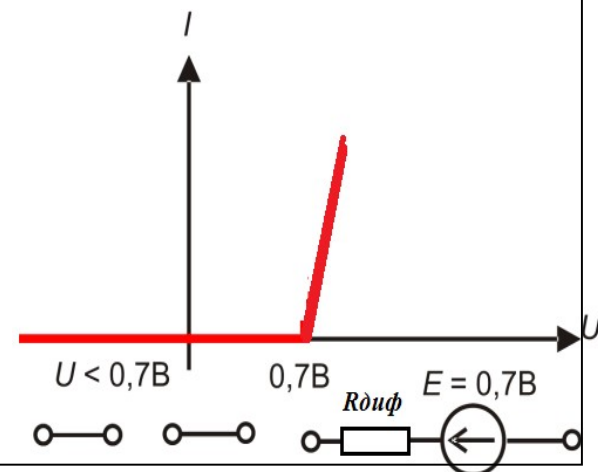
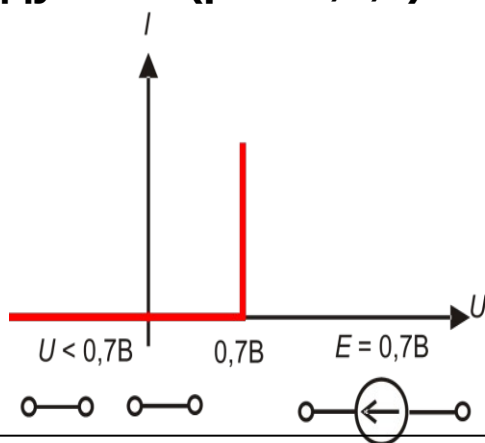
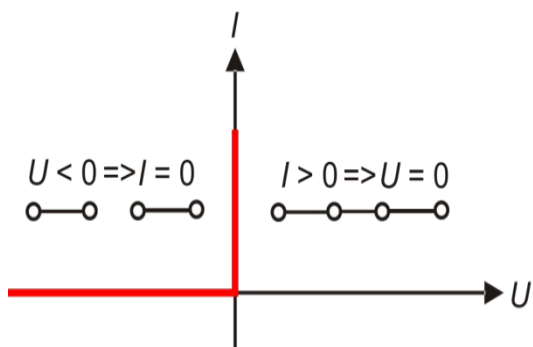
состоит из электрических элементов, которые учитывают физические процессы, происходящие в диоде, и влияние элементов конструкции.

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

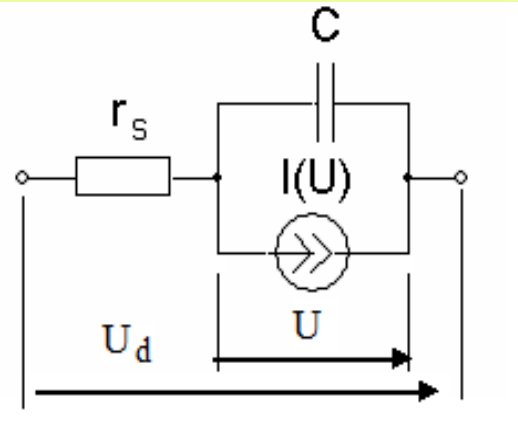
Здесь  $C_d$  — общая емкость диода, зависящая от режима;  
 $r_b$  — объемное сопротивление области базы диода;  
 $R_{ут}$  — сопротивление утечки.

**1.2. Эквивалентная схема замещения  $p-n$  перехода.** При малых сигналах, можно не учитывать нелинейных свойств диода (рис.1 и рис.2) и источник тока заменить на резистор  $R_n = R_{диф}$  — дифференциальное сопротивление перехода, в заданной рабочей точки ( $R_{диф} = \Delta U / \Delta I |_{U=const}$ ).

### 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

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

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

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

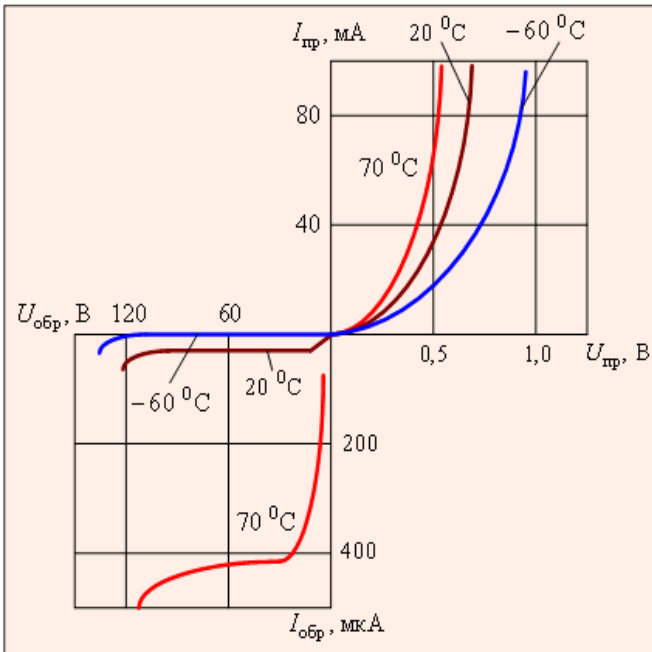
# SPICE параметры диодов

## 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
$\phi_0$	VJ	Контактная разность потенциалов перехода	В	1
$m$	M	Коэффициент плавности перехода	–	0,5
		для линейно леггированного 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	$\infty$
IBV	IBV	Обратный ток пробоя	А	1E-3

## 2.3. Влияние температуры на ВАХ диода



При  $\uparrow T^0$ ,  $\uparrow$  концентрация неосновных носителей в кристалле полупроводника, что  $\uparrow I_{обр}$  (за счет  $I_0$  и  $I_{тг}$ ), и уменьшает объемного сопротивления области базы.

Это влияет на вид прямой, и обратной ветви ВАХ.

**1. Обратная ветвь ВАХ** резко смещается вниз. Зависимость обратного тока от температуры аппроксимируется **выражением**

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

где:  $I_0(T_0)$ -ток при исходной температуре  $T_0$ ;

$T$ -текущая температура;

$T^*$ -температура удвоения обратного тока - (5-6) $^{\circ}\text{C}$  - для Si. и (9-10) $^{\circ}\text{C}$  - Ge.

$$I = I_0(T_0) (e^{U/\varphi T} - 1).$$

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

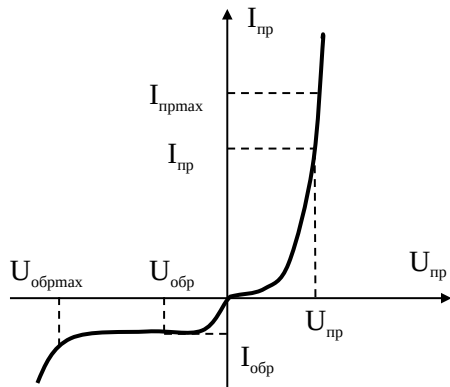
$$T^* = (5-6)^{\circ}\text{C} - \text{для Si}$$

$$T^* = (9-10)^{\circ}\text{C} - \text{для Ge}$$

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

Смещение прямой ветви ВАХ влево характеризуют температурным коэффициентом напряжения (ТКН):  $\alpha_T = \Delta U / \Delta T \approx -2,3 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$ .

## 2.4. Выпрямительные диоды



Выпрямительные диоды – предназначены для выпрямления низкочастотного переменного тока в источниках питания.

В них используется основное свойство диодов – односторонняя проводимость.

**В выпрямительных** диодах используют плоскостные диоды. Они имеют большую площадь *p-n-перехода* и большую барьерную емкость, что не позволяет выпрямлять на высоких частотах. Кроме того такие диоды имеет большую величину обратного тока.

**Основные предельные параметры выпрямительных диодов:**

• **Максимально допустимый выпрямленный ток**  $I_{вп.ср.мах}$  — средний ток через диод (постоян. составляющая), при котором обеспечивается его длительная и надежная работа.

• **Максимально допустимое обратное напряжение**  $U_{обр.мах}$  — наибольшее обратное напряжение, при котором диод может длительно и надежно работать.

• **Максимальная рассеиваемая мощность**  $P_{ср}$  — среднее значение рассеиваемой мощности за период.

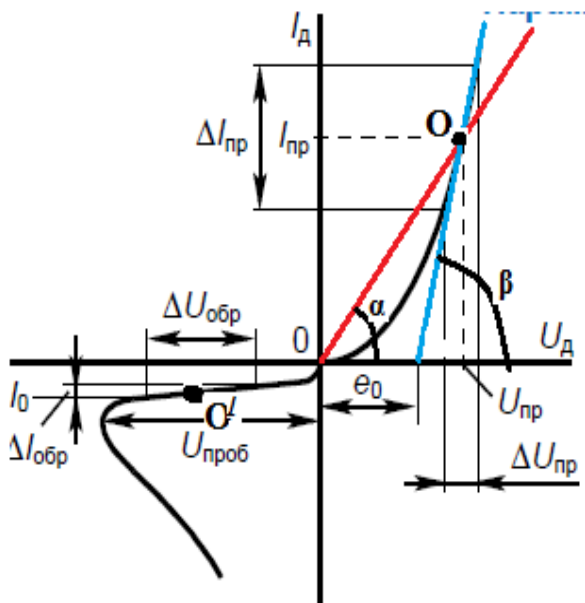
• **Максимальная частота**  $f_{мах}$  — наибольшая частота подводимого напряжения, при которой выпрямитель на данном диоде работает достаточно эффективно. А также:

• **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.

• **Коэффициент выпрямления**  $= I_{пр} / I_{обр}$  - определяет эффективность работы.

# Параметры выпрямительных диодов



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

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

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;
- $U_{проб}$  – напряжение пробоя – обратное напряжение, при котором происходит электрический пробой p-n-перехода;
- **Статическое сопротивление диода:**  $R_{ст} = U_{пр} / I_{пр}$ ,
- где I и U – ток и напряжения на диоде для точки O.
- **Дифференциальное) сопротивление :**  $R_{дин} = \Delta U / \Delta I$ ,
- где  $\Delta U$  и  $\Delta I$  – приращение тока и напряжения диода в заданной рабочей точке O.

## Типовые значения параметров диода (ЗНАТЬ!)

$e_0 = 0,6 \div 0,7 \text{ В} - \text{Si}$ ;

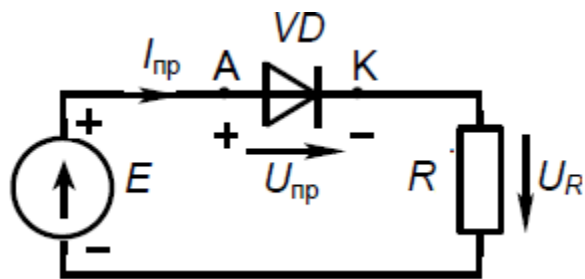
$e_0 = 0,2 \div 0,3 \text{ В} - \text{Ge}$ .

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

$I_0 = \text{десятки} \div \text{сотни мкА}$ ;  $I_0 \text{ Ge} \approx 10 \cdot I_0 \text{ Si}$ .

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

# Типовая задача на диоды: Определить режим работы диода по постоянному току ( $I_D$ и $U_D$ )



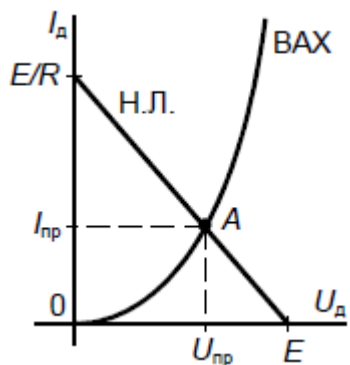
**1. Включение диода в прямом направлении**  
**Определение  $I_{пр}$  и  $U_{пр}$  с помощью ВАХ:**

- $E = I_D \cdot R + U_D$  - уравнение нагрузочной прямой и
- $I_D = F(U_D)$  - ВАХ диода

Нагрузочная прямая (линия) строится по двум точкам:

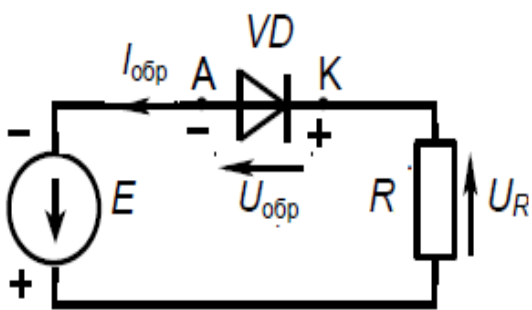
- $U_D = 0; I_D = E/R;$
- $I_D = 0; U_D = E.$

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



Для надежной работы диода должно выполняться условие :  $I_D < I_{D.пр.макс}$

## 2. Включение диода в обратном направлении

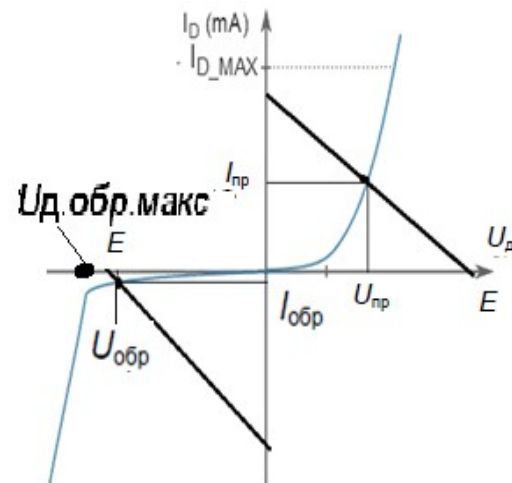


На обратной ВАХ строим нагрузочную прямую:

- $U_D = 0; I_D = -E/R;$
- $I_D = 0; U_D = -E.$

Найдем РТ:

$$I_D = I_{обр} \approx 0, U_D = U_{обр} \approx -E$$

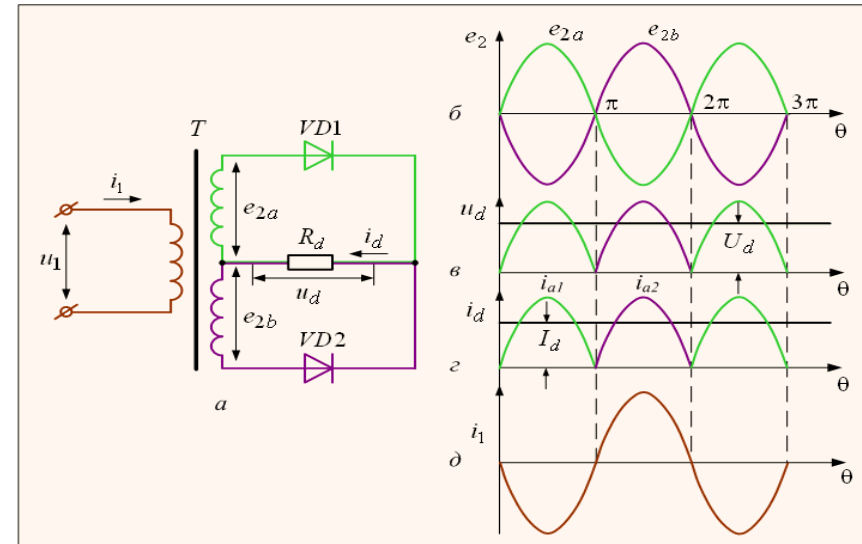


Внешнее запирающее напряжение на диоде должно быть меньше предельно-допустимого обратного напряжения:  $U_{обр} < U_{D.обр.макс}$

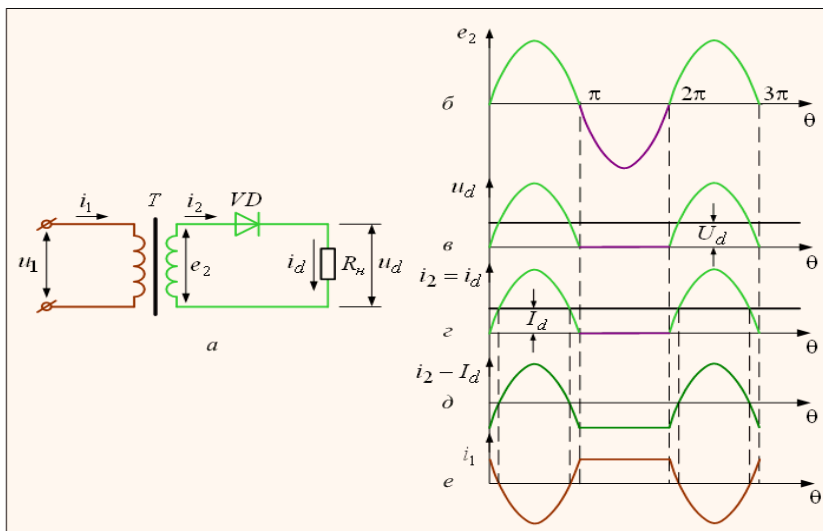
# Применение выпрямительных полупроводниковых диодов

Выпрямители служат для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное.

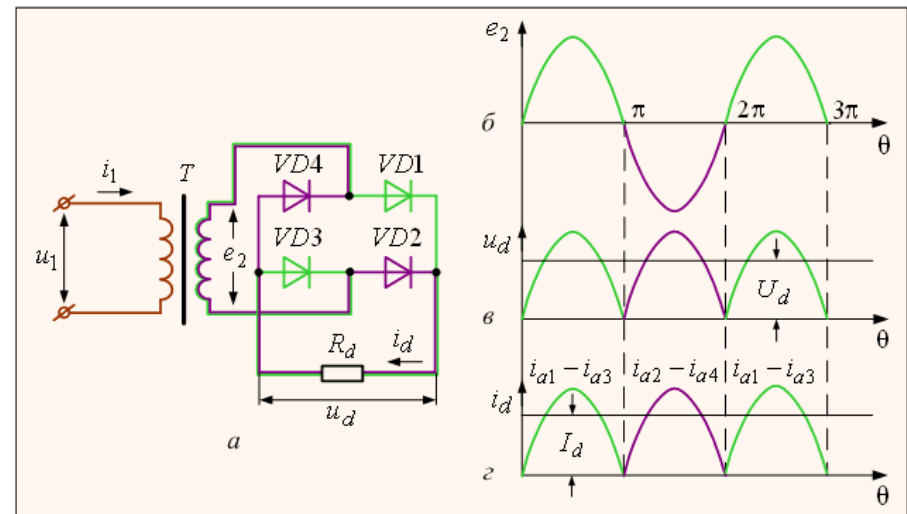
Основными компонентами выпрямителей служат диоды – элементы с явно выраженной нелинейной ВАХ. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды



Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой



Однофазный однополупериодный выпрямитель



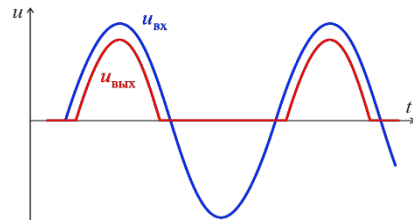
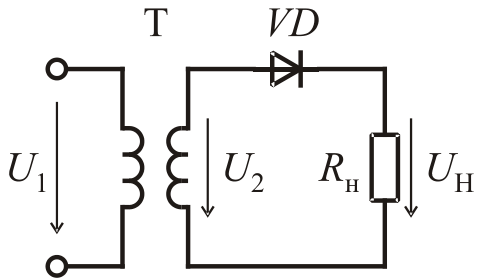
Однофазный мостовой выпрямитель

# Применение выпрямительных полупроводниковых диодов

Выпрямители служат для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное.

Основными компонентами выпрямителей служат диоды – элементы с явно выраженной нелинейной ВАХ. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды

## Однофазный однополупериодный выпрямитель



$$U_{cp} = \frac{U_{вхm}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_{вх}}{\pi} \approx 0.45U_{вх}$$

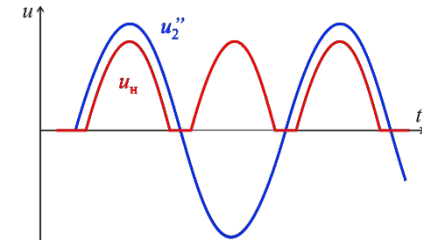
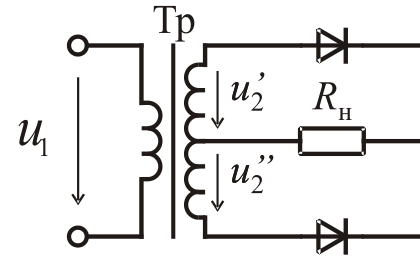
Среднее значение выпрямленного напряжения

Максимальное обратное напряжение на диоде

$$U_{обрmax} = \sqrt{2}U_{вх} = \pi U_{cp}$$

## Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

Диоды проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода.

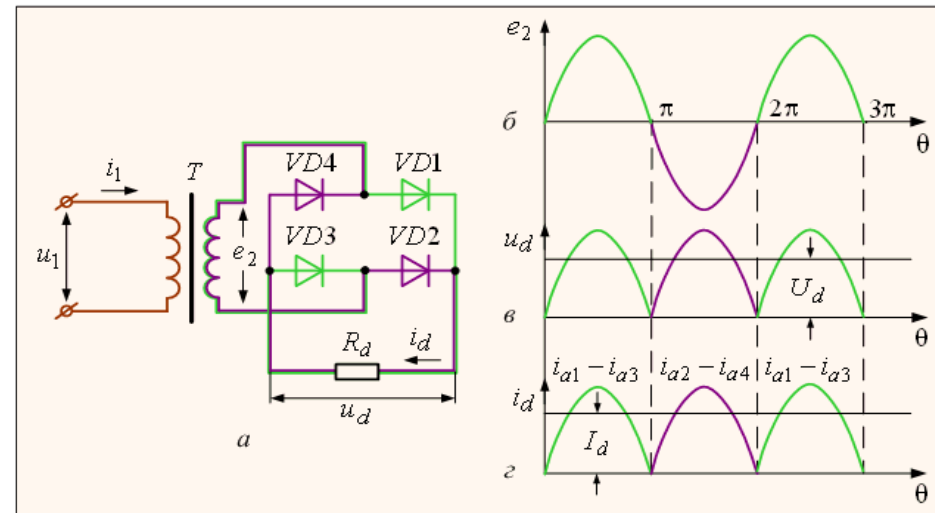


Средние значения тока

$$I_H = \frac{2}{\pi} I_{2m}$$

и напряжения нагрузки

$$U_H = \frac{2U'_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U'_2}{\pi} \approx 0.9U'_2$$



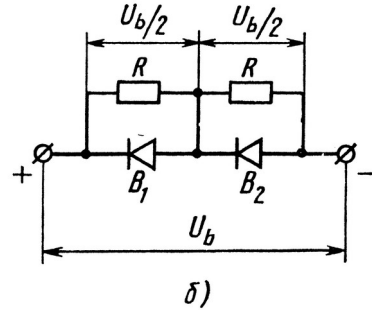
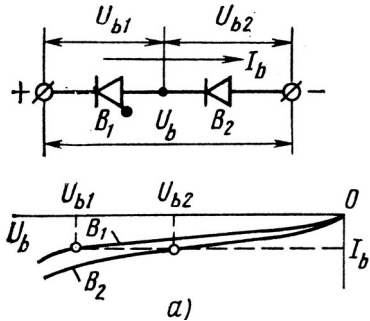
## Однофазный мостовой выпрямитель

# Последовательное и параллельное включение диодов

Если для выпрямительной схемы нельзя выбрать нужный тип диода в соответствии с заданным значением обратного напряжения или прямого тока, то используют два или более однотипных диодов с меньшими значениями параметров, включая эти диоды последовательно или параллельно.

**Последовательное соединение** диодов используют в высоковольтных цепях для увеличения суммарного допустимого обратного напряжения.

Однако из-за разброса параметров диодов напряжения на них распределяются неравномерно.

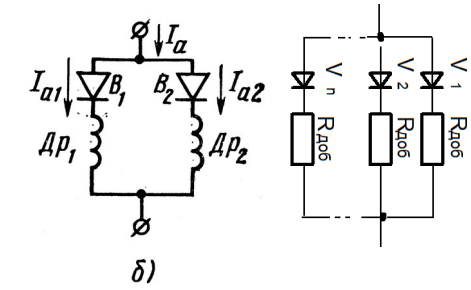
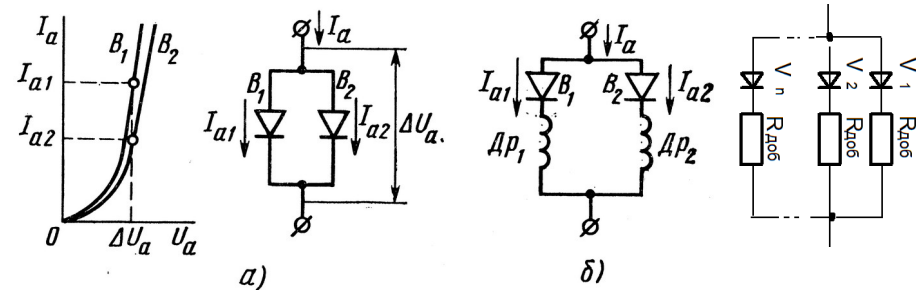


Для исключения неравномерного распределения обратного напряжения диоды в последовательной цепи шунтируют резисторами  $R$  (рис. 3.7, б).

Выбор сопротивления шунтирующих резисторов производят, исходя из того, чтобы ток, протекающий через резистор  $R$ , был на порядок больше обратного тока диодов, т.е.

$$R_{ш} \approx 0,1 R_{обр}$$

**Параллельное соединение диодов** предназначено для увеличения суммарного прямого тока. Однако из-за возможного разброса параметров диодов токи диодов будут неодинаковыми.



Для выравнивания токов используют:

1. диоды с малым различием прямых ветвей ВАХ

2. **индуктивные делители тока** (рис. 3.6, б). При введении в каждую из параллельных ветвей дополнительной индуктивности возникает э. д. с. самоиндукции при нарастании тока в ветвях, вследствие чего различие токов в параллельных ветвях, вызванное разбросом параметров диодов, становится менее ощутимым.

3. введением в параллельные ветви дополнительных **активных сопротивлений**, однако при этом создаются дополнительные потери мощности, особенно при больших токах. Дополнительное сопротивление выбирается из соотношения  $R_{доп} \approx 10 R_{пр}$

## 2.5. Импульсные диоды

**Импульсные диоды** –предназначены для работы в ключевом режиме в импульсных схемах, где обычно выполняют роль электронного ключа.

Электрический ключ имеет два состояния:

1. Замкнутое, сопротивление равно нулю,  $R_{vd} = 0$ .
2. Разомкнутое, сопротивление бесконечно  $R_{vd} = \infty$ .

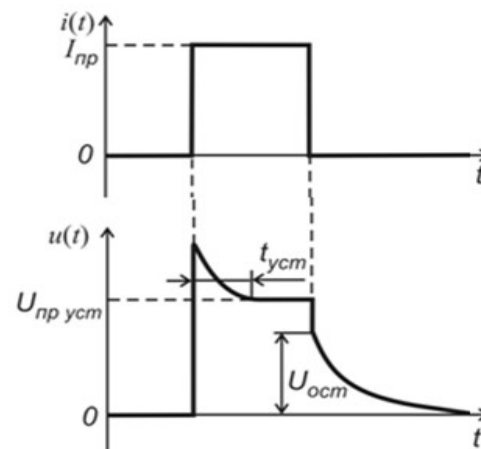
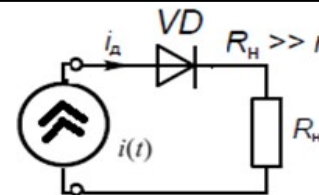
Этим требованиям удовлетворяют диоды в зависимости от полярности приложенного напряжения.

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

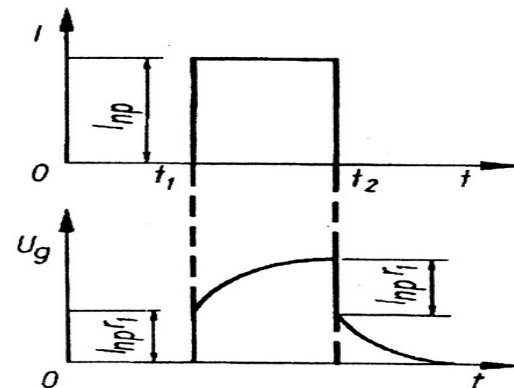
- а) ёмкость диода – точечные диоды и диоды Шоттки .
- б) конечной скоростью диффузии и связанные с ней времена накопления и рассасывания неосновных носителей заряда.

**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. Это время связано с накопления в базе неосновных носителей заряда инжектируемых эмиттером, которые снижает прямое сопротивление диода.



При сильном уровне инжекции



При слабом уровне инжекции

# Импульсные диоды

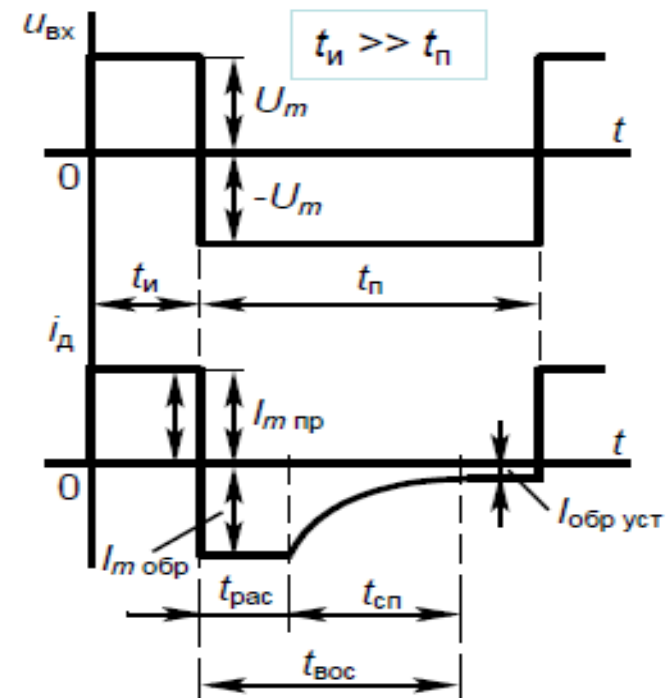
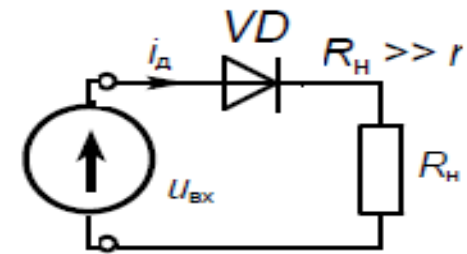
**2.Время восстановления обратного сопротивления диода ( $t_{восст.}$ )** - время, в течение которого обратный ток диода после переключения полярности приложенного напряжения с прямого на обратное достигает своего стационарного значения с заданной точностью. Оно связано с рассасыванием в базе неосновных 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.  $C_d$  – 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.

Конструктивно импульсные диоды (рис. 5.20) изготавливают так, чтобы емкость перехода была малой и рекомбинация носителей происходила как можно быстрее. Импульсные диоды как правило имеют мезаструктуру (от испанского слова «меза» – стол).

Сначала на пластине основного полупроводника диффузионным методом создается слой с другим типом электропроводности. Далее эта пластина покрывается специальной маской и подвергается травлению. Маска защищает от травления много небольших участков. Именно в этих защищенных областях остаются  $p$ - $n$ -переходы малого размера, которые возвышаются над поверхностью пластинки в виде «столиков». Затем пластина разделяется на отдельные чипы – диоды. Особенностью мезадиодов является уменьшенный объем базовой области. За счет этого сокращается время накопления и рассасывания носителей в базе. Групповая технология изготовления большого числа диодов из одной пластины обеспечивает сравнительно малый разброс их характеристик и параметров.

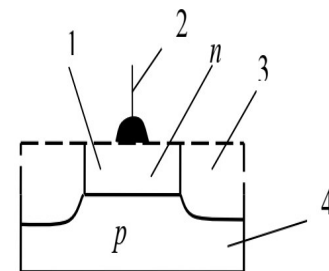
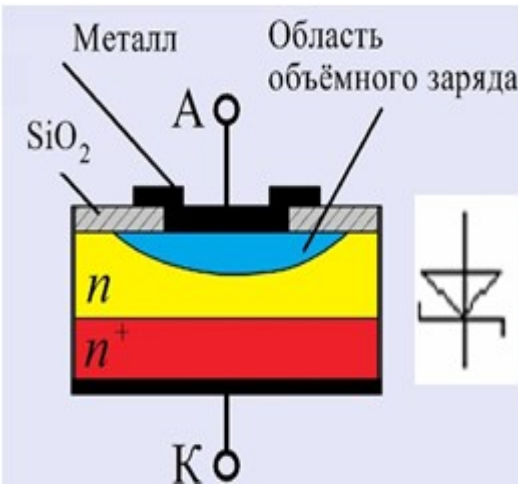


Рис. 5.20. Устройство мезадиода:

- 1 – слой с электропроводностью  $n$ -типа, полученный диффузией;
- 2 – вывод от  $n$ -области; 3 – участок, удаляемый травлением;
- 4 – основная пластинка полупроводника  $p$ -типа

## 2.6. Диоды Шоттки

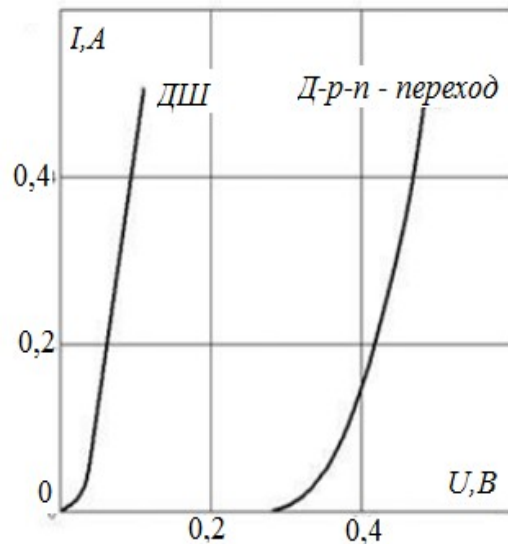


Электрический переход, возникающий на границе металл - полупроводник, при определенных условиях обладает выпрямительными свойствами. Переход создается путём напыления металла на высокоомный полупроводник, например, n-типа.

Главная особенность ДШ-отсутствие неосновных носителей заряда в процессе 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.

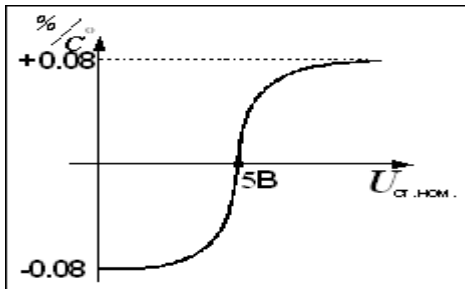
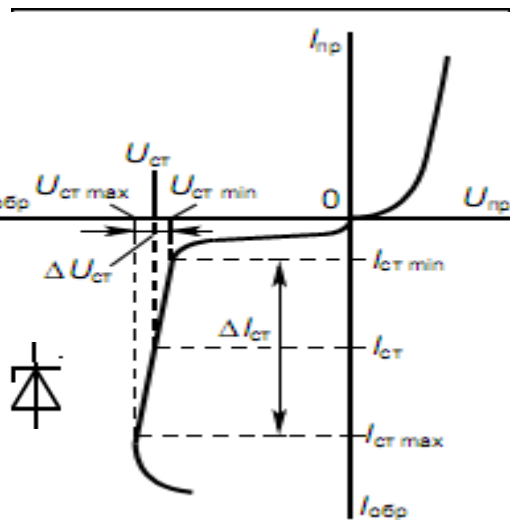
Второй особенностью этих диодов является малое (по сравнению с обычными кремниевыми диодами) прямое напряжение, оно менее 0,3 В. Это связано с тем, что их тепловой ток, примерно, на три порядка превышает ток р-п- перехода.

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



**Достоинства диодов :** 1. высокое быстродействие переключения ; 2. малое прямое напряжение  $\approx 0,15 \div 0,3B$ .  
**Недостатки:** 1. сравнительно небольшое обратное напряжение ( $U_{обр} < 250B$ ) , 2. большие обратные токи.

# 2.7. Стабилитроны и стабисторы



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

## Основные параметры стабилитрона:

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

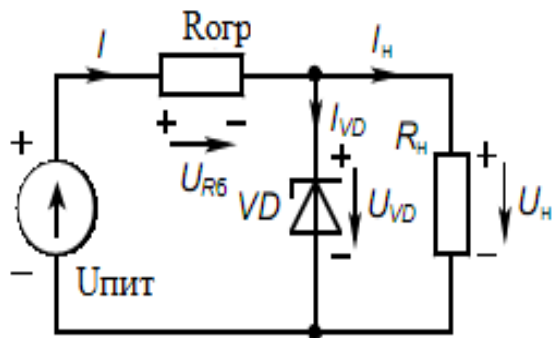
**ТКН** – температурный коэффициент напряжения стабилизации:

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

$U_{ст.ном.} < 5В$  - 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 ( $R_n$ ).

### Анализ работы схемы.

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

Запишем это уравнение относительно приращений:

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

Разрешим его относительно  $\Delta U_n$ , получим

$$\Delta U_n = \Delta U_{пит} / [1 + R_{орр} / r_{ст} + R_{орр} / R_n] - \text{нестабильность } U_n$$

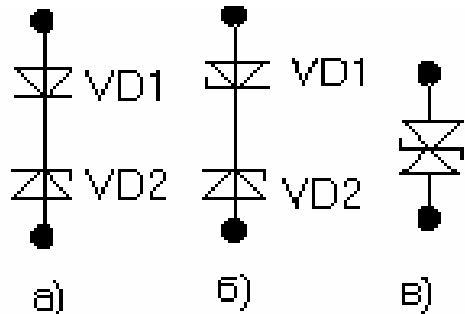
Чем больше  $R_{орр} / r_{ст}$  и меньше  $r_{ст}$  тем меньше  $\Delta U_n$ .

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

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

2. Расчет  $R_{орр}$ :

$$R_{орр} = \frac{U_{пит} - U_{ст.ном}}{I_{ст.ном}}$$



### Разновидности стабилитронов:

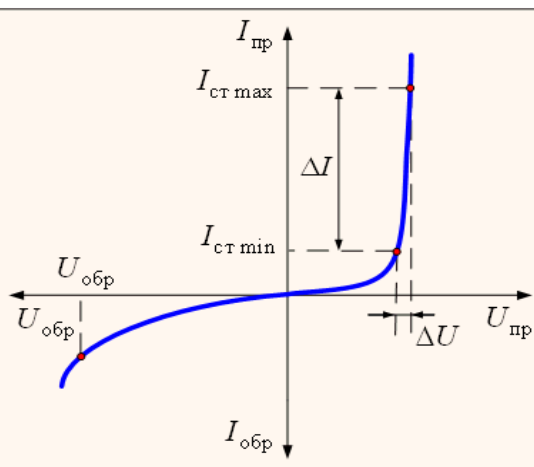
**1. Прецизионные.** Они имеют малое значение ТКН и нормированную величину  $U_{ст.ном}$ .  $TKN_{VD2} > 0$ ,  $TKN_{VD1} < 0$ . Общий ТКН равен их сумме, он оказывается малым по величине.

**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 них база сильно легирована примесями ( $r_b \rightarrow 0$ ), а потому прямая ветвь практически идет вертикально.

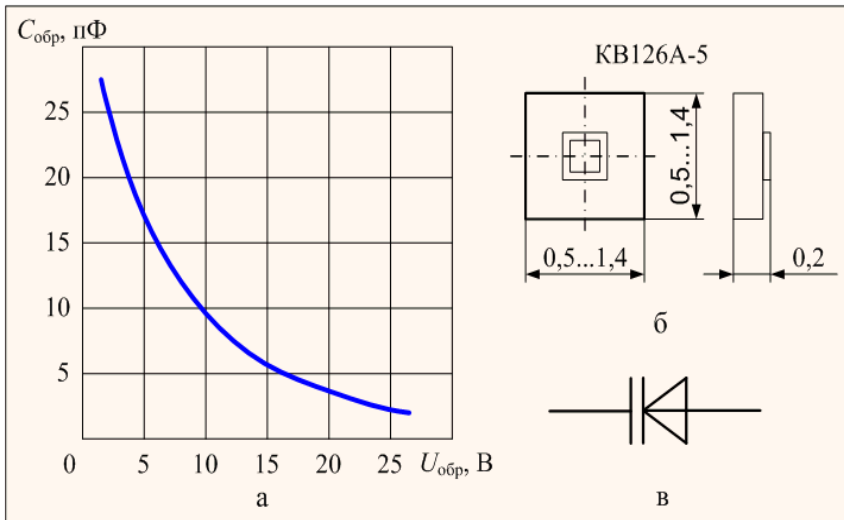
Параметры стабистора аналогичны параметрам стабилитрона. Они применяются для стабилизации малых напряжений ( $U_{ст.ном} \approx 0.6V$ ), ток стабисторов - от 1mA до нескольких десятков mA и ТКН - отрицательный



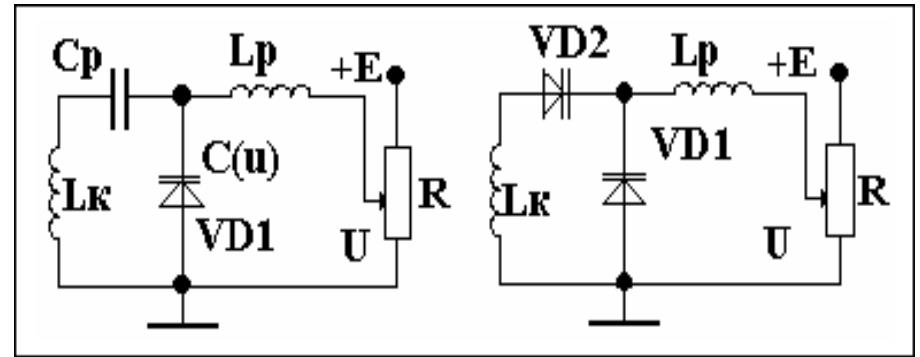
ВАХ стабистора

# Варикапы

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



$$C_{бар.} = C_0 \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_k + U} \right)^{\nu} \quad C_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S_{p-n}}{l_{p-n}}$$

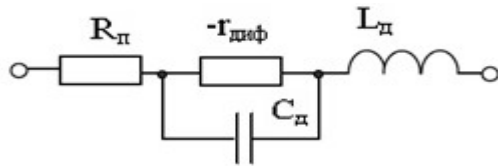
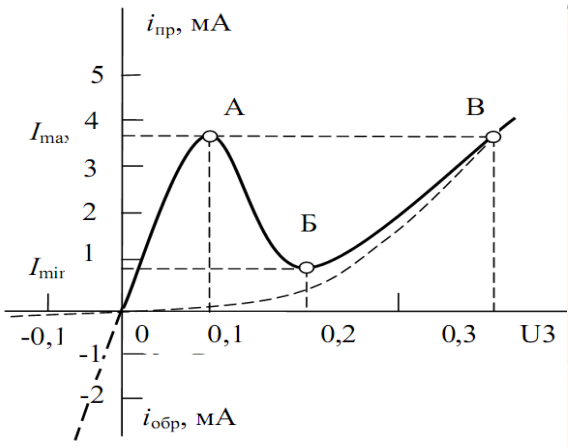


## Основные параметры варикапов:

- 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  $\alpha$**  – 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) р-п структур с концентрацией примеси  $\sim 10^{21}$ .



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

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

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

**Основные параметры** туннельного диода :

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

**Параметры схемы замещения:**

индуктивность  $L_d$  — полная последовательная индуктивность диода ;

дифференциальное сопротивление  $\Gamma_{\text{диф}}$

резонансная частота туннельного диода  $f_0$  - частота, при которой общее реактивное сопротивление р-п-перехода и индуктивности туннельного диода обращается в нуль;

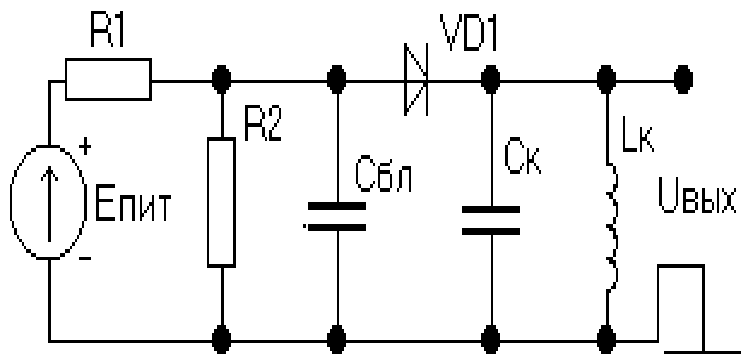
$R_n$  — суммарное сопротивление кристалла, контактов и выводов.

Максимально допустимым параметры:

максимально допустимый постоянный прямой ток  $I_{pr \text{ max}}$ ,

максимально допустимый прямой импульсный ток  $I_{pr.i \text{ max}}$

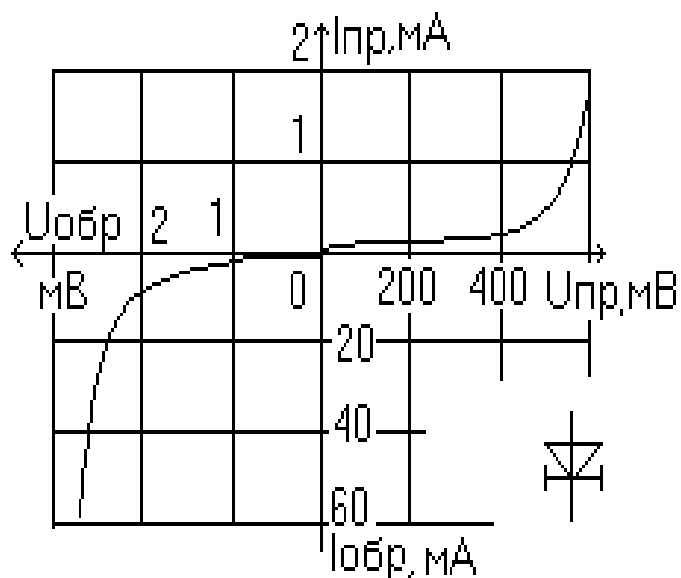
максимально допустимый постоянный обратный ток  $I_{obr \text{ max}}$ , максимально допустимая СВЧ мощность  $P_{свч \text{ max}}$ , рассеиваемую диодом.



**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; Lк, Ск – колебательный контур;

Сбл - 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 на порядок 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).

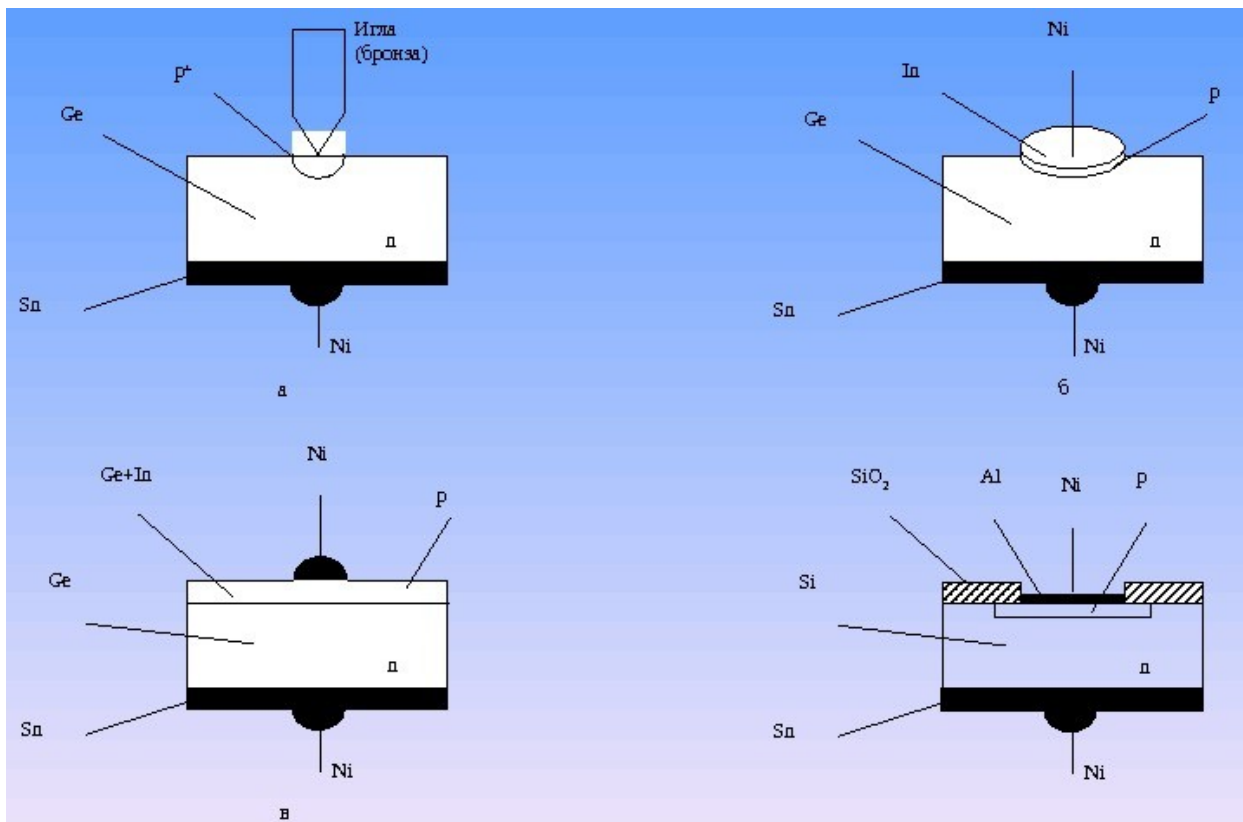
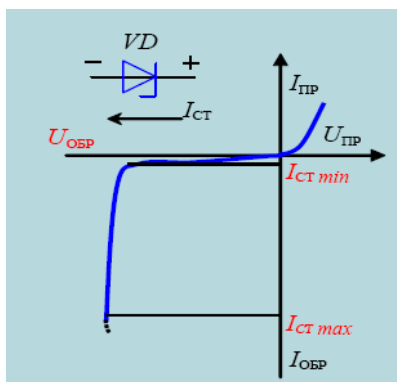
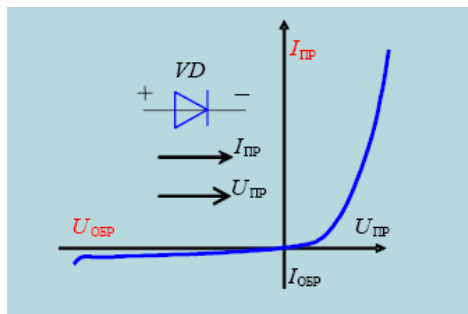


Рис. 1. Структуры полупроводниковых диодов: точечного (а); сплавного (б); диффузионного (в); планарного (г)