

ЭЛЕКТРОНИКА

Лектор:

к.ф.-м.н. Алимгазинова Назгуль Шакаримовна

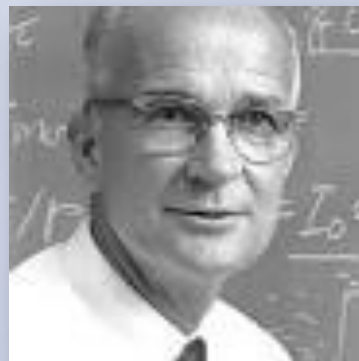
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Полупроводниковый диод – полупроводниковый нелинейный элемент с двумя выводами, имеющий один p–n-переход.



*Heinrich Rudolf Hertz
(1857-1894)*

1906 год: Открытие явления диодной проводимости у полупроводников было сделано Генрихом Герцем.



*William Bradford Shockley
(1910 – 1989)*

1909 год: Уильям Шокли впервые опубликовал работу о теории диода.

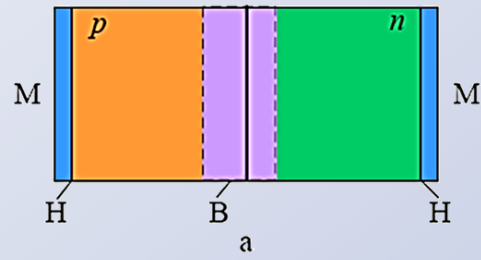
1930-е годы:

Развитие технологий и производство диодов с помощью кремния и германия.

Современность: Развитие полупроводниковой технологии позволило создавать различные типы диодов для разнообразных применений.

Тип перехода

а) *p-n*-переход и **2** омических перехода, через которые соединяются выводы диода



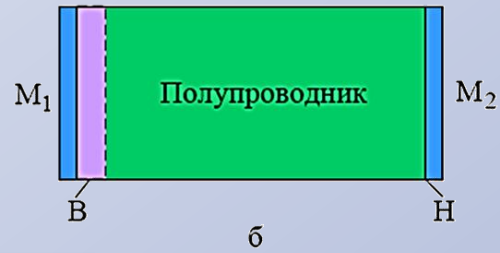
с выпрямляющим p-n-переходом

M - металл

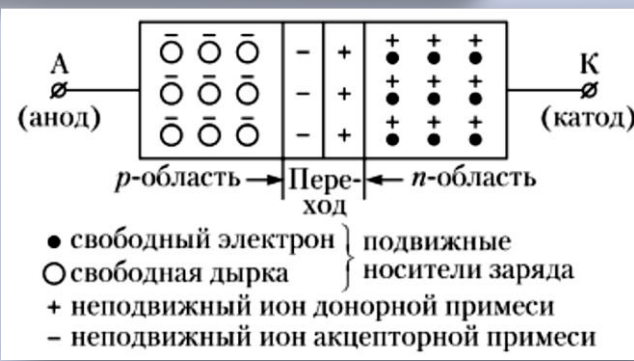
H - невыпрямляющий электрический (омический) переход

B - выпрямляющий электрический переход

б) *p-n*-переход «металл – полупроводник» и **1** омический переход

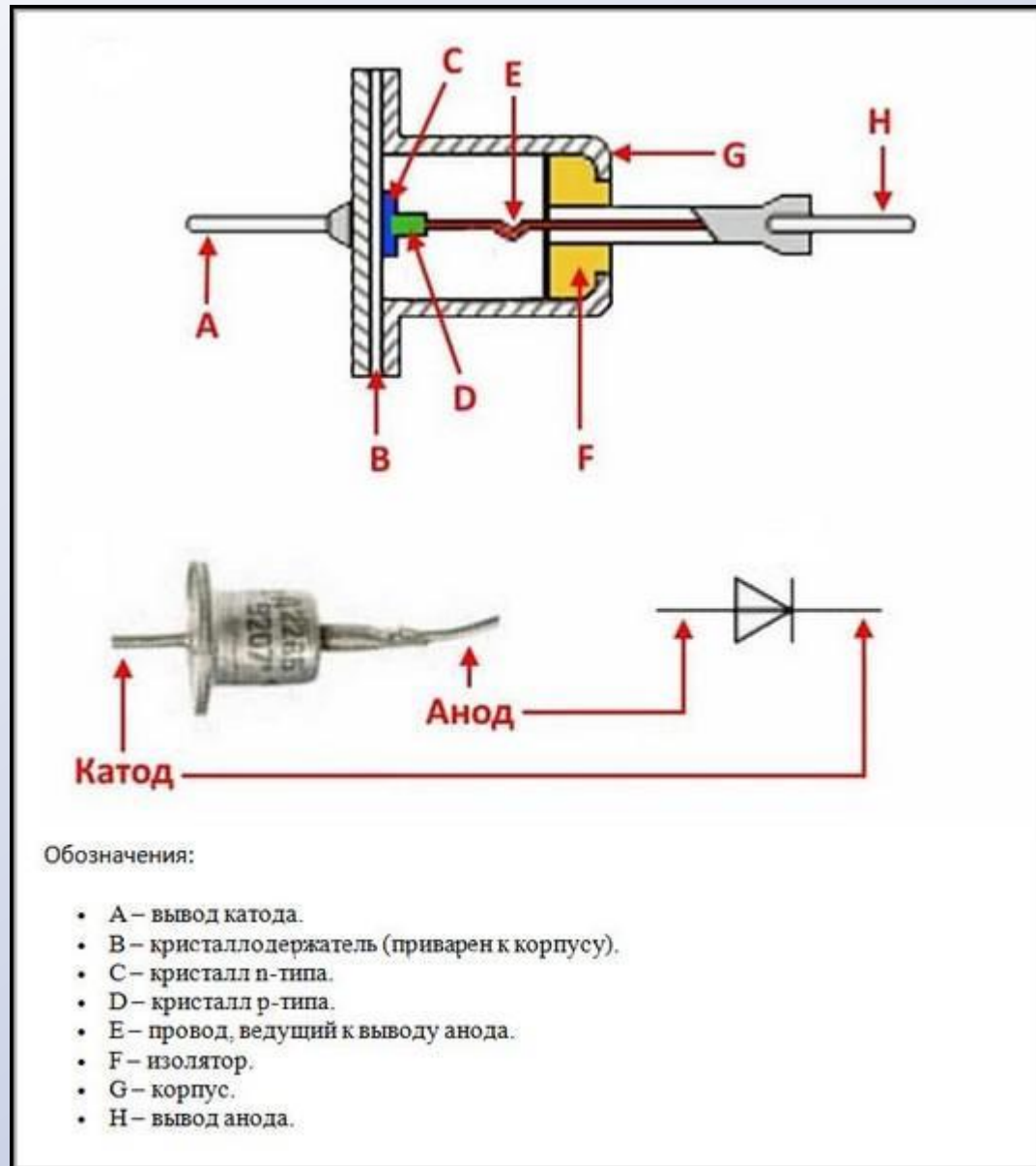


с выпрямляющим p-n-переходом на контакте «металл-полупроводник»



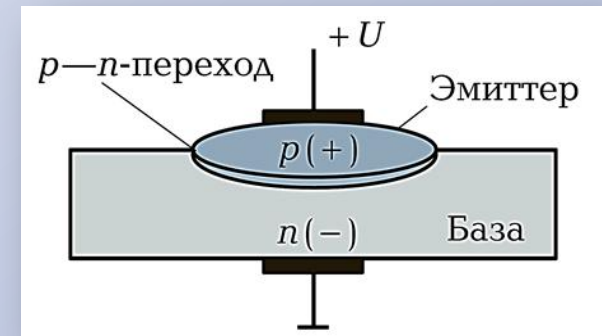
УГО

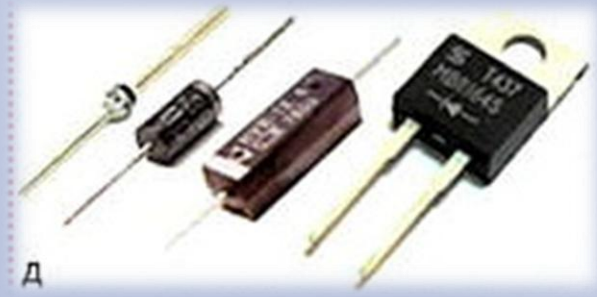
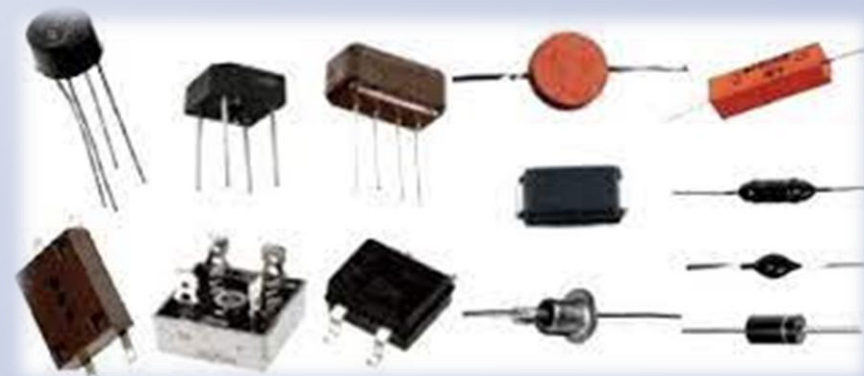
1. Структура полупроводникового диода



Обозначения:

- А – вывод катода.
- В – кристаллодержатель (приварен к корпусу).
- С – кристалл n-типа.
- D – кристалл p-типа.
- E – провод, ведущий к выводу анода.
- F – изолятор.
- G – корпус.
- H – вывод анода.





2. Применение

- 1. Выпрямление переменного (или импульсного) тока и получение в результате постоянного.*
- 2. Детектирование амплитудно-модулированных или импульсных сигналов.*
- 3. Смешивание или перемножение сигналов, в частности детектирование частотно- и фазомодулированных сигналов.*
- 4. Фиксация определённого уровня сигнала.*
- 5. Логическая операция "И" в цифровой электронике.*
- 6. Переключающие диоды - для переключения высокочастотных сигналов.*

Преимущества полупроводниковых диодов

- *не требуют специального источника энергии для образования носителей заряда;*
- *очень компактны, миниатюрны.*
- *отсутствуют потери энергии на накал катода*
- *высокий КПД*
- *дешевизна*

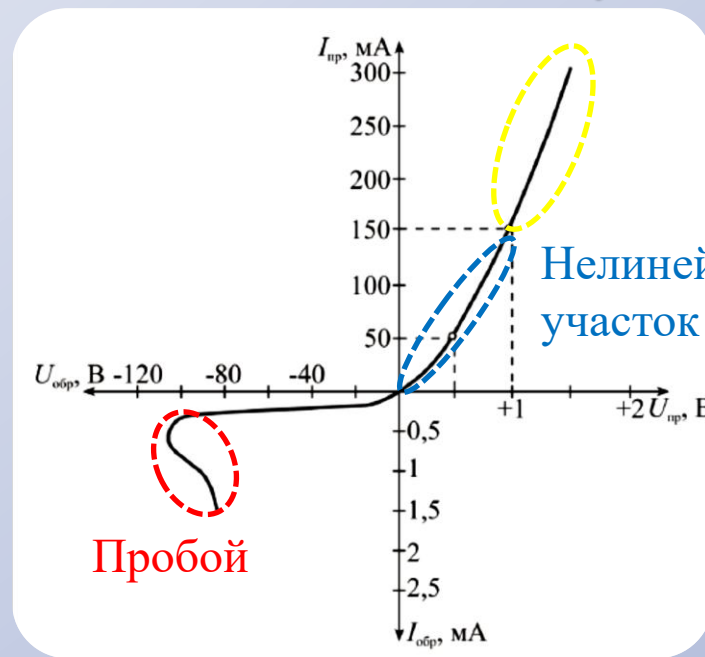
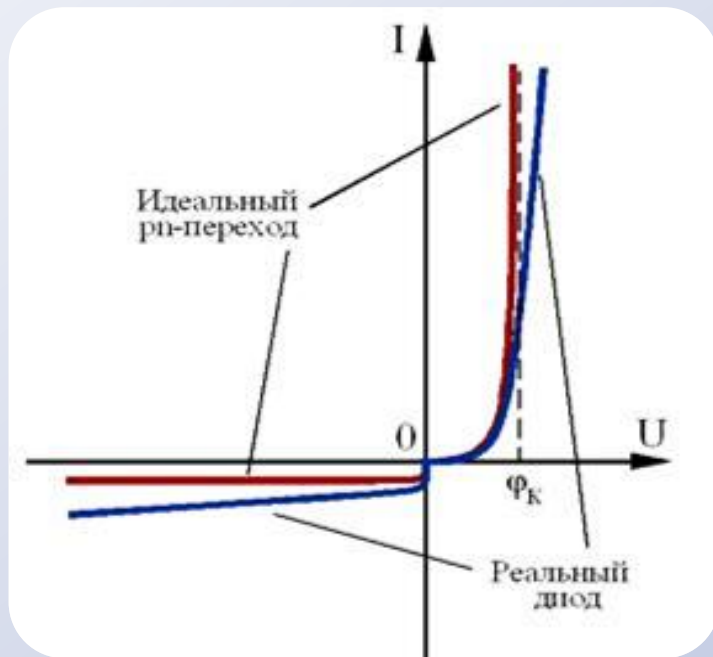
Недостатки:

- *Работают в ограниченном интервале температур (не ниже – 70⁰С и не выше 125⁰С)*
- *Выходят из строя в условиях повышенной радиации (появляется огромное количество новых электронов и дырок)*

3. Вольт-амперная характеристика (ВАХ)

Идеальный электрический вентиль (диод) не имеет потерь, его сопротивление в проводящем направлении равно нулю, в непроводящем – бесконечности.

Линейный участок ВАХ



Нелинейный участок ВАХ

Виды пробоя

электрический
(обратимый)

тепловой
(необратимый)

лавинный

туннельный

ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ

происходит при нагреве перехода. За счет тепловой энергии происходит генерация пар электрон – дырка. Это приводит к увеличению обратного тока и дальнейшему увеличению температуры. Процесс нарастает лавинообразно и приводит к изменению структуры кристалла, выводя его из строя.

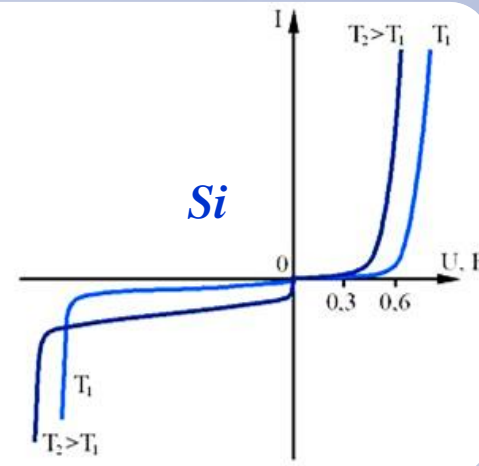
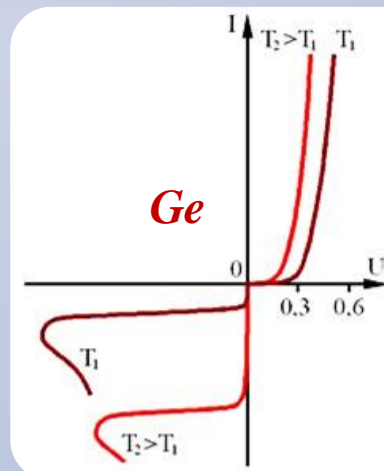
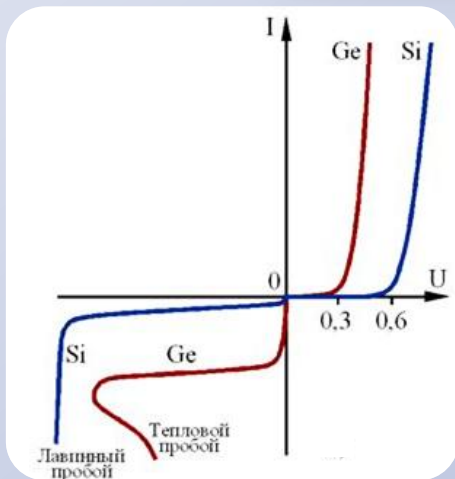
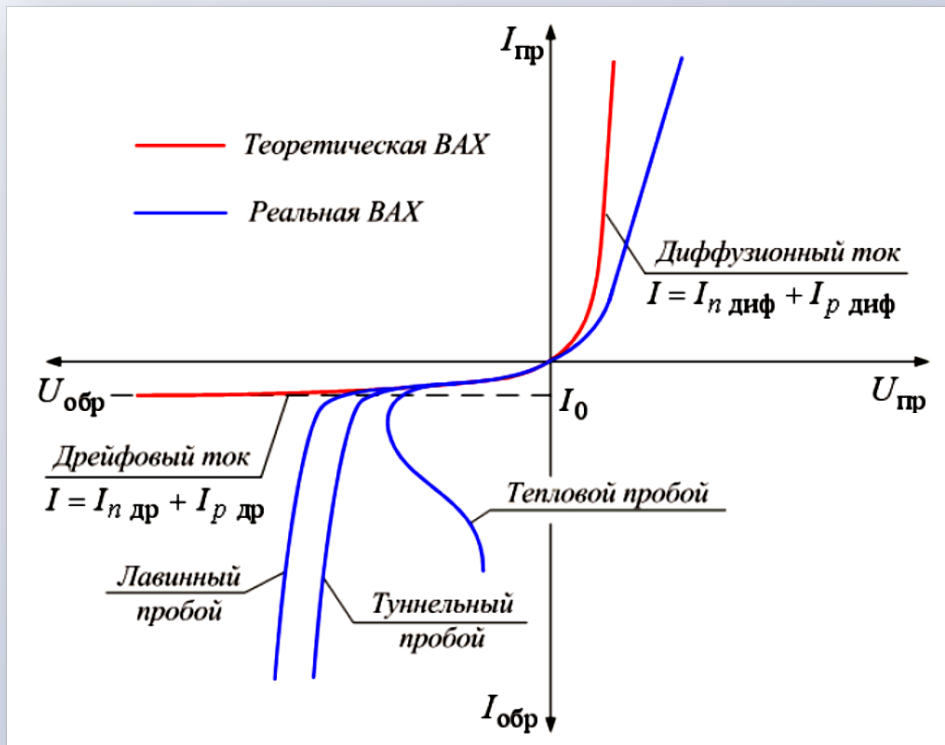
ТУННЕЛЬНЫЙ ПРОБОЙ

наблюдается тогда, когда напряженность электрического поля такова, что становится возможным туннельный переход из валентной зоны полупроводника с электропроводностью одного типа в зону полупроводника с электропроводностью другого типа. Как правило, туннельный пробой наблюдается при напряжениях ниже 6 В.

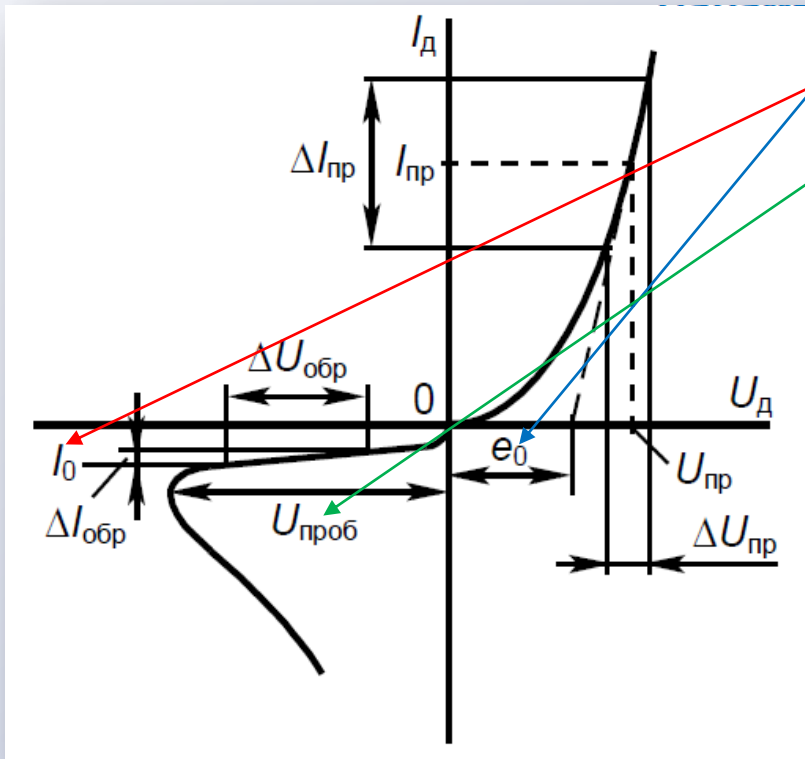
ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ обусловлен образованием носителей заряда из-за ударной ионизации атомов полупроводника. Если напряженность электрического поля достаточно велика, то электроны приобретают энергию, достаточную для того, чтобы выбивать другие электроны из атомов кристаллической решетки. Этот процесс приводит к быстрому (лавинному) нарастанию обратного тока.

Напряжение

- туннельного пробоя – не более единиц вольт.
- лавинного пробоя - десятки ÷ сотни вольт.



Параметры реальной ВАХ диода



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

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

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

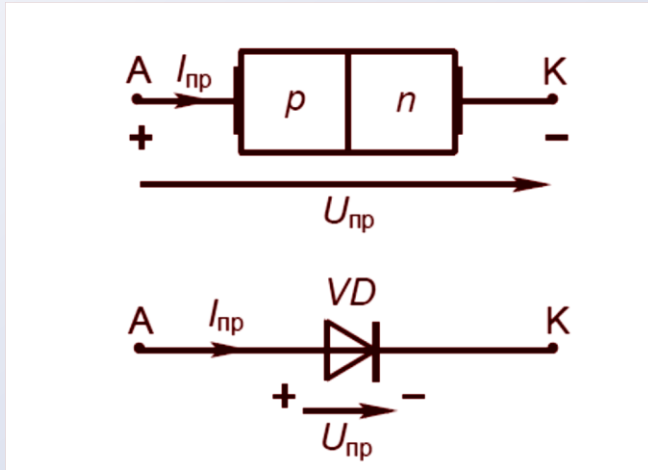
$I_0 = \text{десятки} \div \text{сотни мкА}$;
 $I_{0\ Ge} \approx 10 \cdot I_{0\ Si}$

$e_0 = 0,4 \div 0,6В - Si$;
 $e_0 = 0,2 \div 0,3В - Ge$.

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

4. Включение диода в электрическую цепь

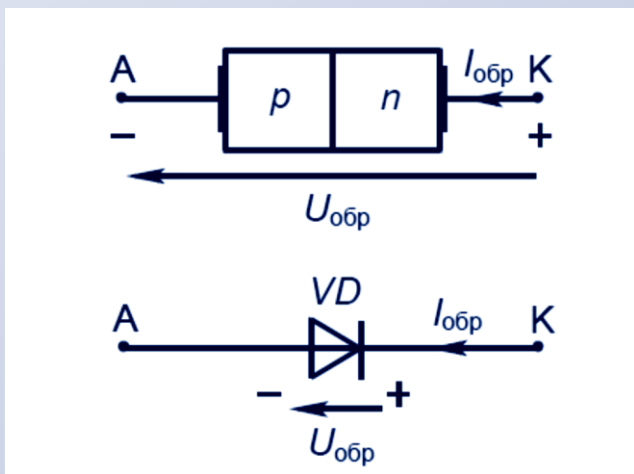
ВКЛЮЧЕНИЕ ДИОДА В ПРЯМОМ НАПРАВЛЕНИИ



Полярность внешнего напряжения **СОВПАДАЕТ** со знаком основных носителей заряда в полупроводниках:
«+» подключен к p -области;
«-» подключен к n -области.

Диод **ОТКРЫТ** (ВКЛЮЧЕН)

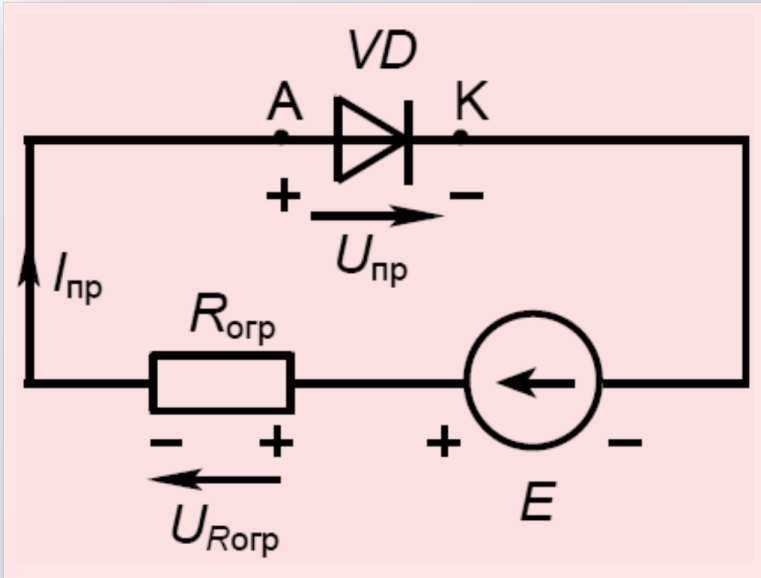
ВКЛЮЧЕНИЕ ДИОДА В ОБРАТНОМ НАПРАВЛЕНИИ



Полярность внешнего напряжения **НЕ СОВПАДАЕТ** со знаком основных носителей заряда в полупроводниках:
«+» подключен к n -области;
«-» подключен к p -области.

Диод **ЗАПЕРТ** (ВЫКЛЮЧЕН)

ВКЛЮЧЕНИЕ ДИОДА В ПРЯМОМ НАПРАВЛЕНИИ



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

Резистор $R_{огр}$ служит для защиты диода и источника питания E ОТ ПЕРЕГОРАНИЯ!

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.

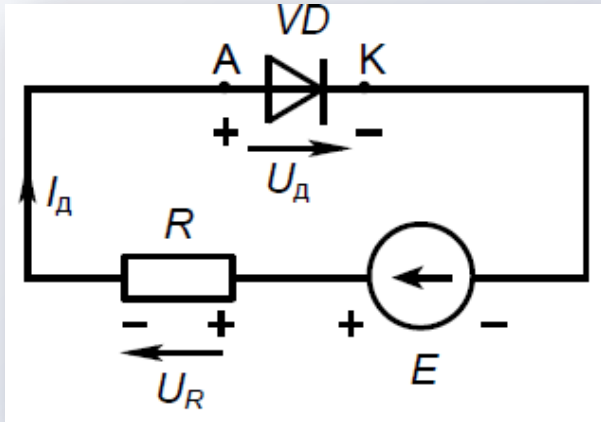
$$E = I_{пр} \cdot R_{огр} + U_{пр} \Rightarrow I_{пр} = \frac{E - U_{пр}}{R_{огр}}.$$

$U_{пр}$ – прямое падение напряжения на диоде.

$$e_0 = 0,4 \div 0,6 \text{ В} - \text{Si};$$
$$e_0 = 0,2 \div 0,3 \text{ В} - \text{Ge}.$$

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

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



Уравнение нагрузочной прямой: $E = I_d R + U_d$

В режиме холостого хода (ХХ) ток в цепи

1. $I_d = 0$; тогда $U_d = E$.

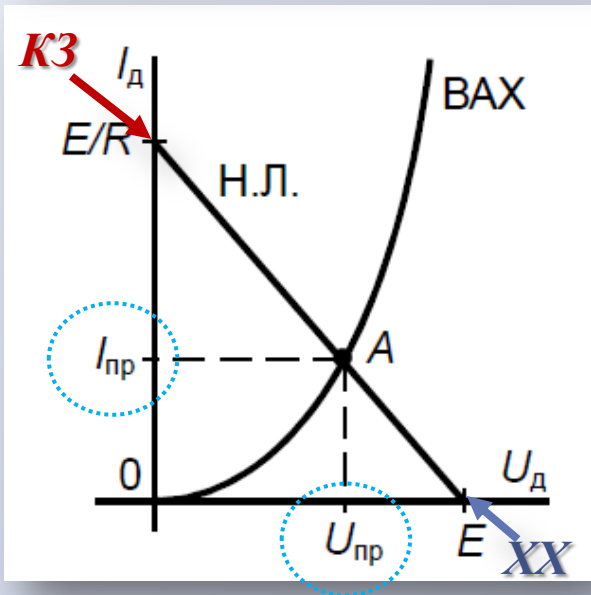
и в режиме короткого замыкания (КЗ) напряжение

2. $U_d = 0$; тогда $I_d = E/R$;

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

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

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



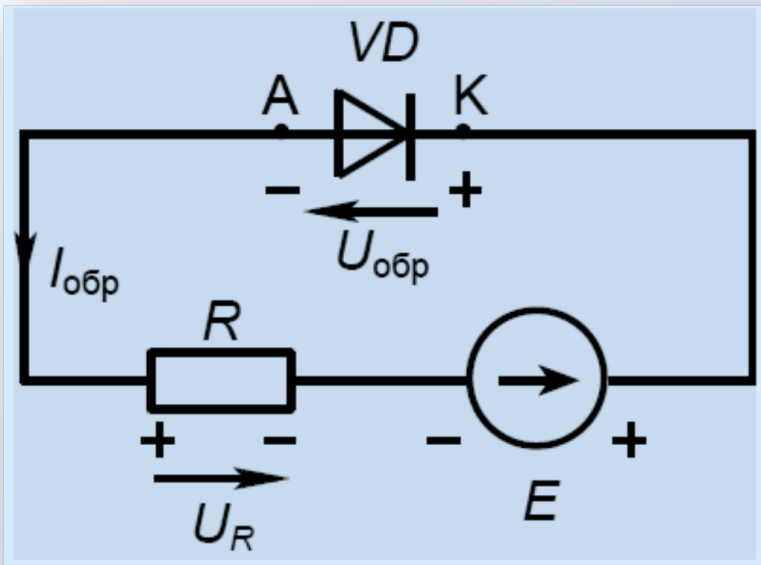
$I_{пр}$ – прямой ток диода, ограничивается предельно допустимым значением $I_{пр\ max}$ (справочный параметр). Чтобы диод не выгорел необходимо обеспечить:

$$I_{пр} < I_{пр\ max}$$

- $E \gg U_{пр}$ то в расчетах пренебрегают значением $U_{пр}$;
- $E \approx U_{пр}$ то $U_{пр}$ учитывают (для повышения точности расчетов).

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.

ВКЛЮЧЕНИЕ ДИОДА В ОБРАТНОМ НАПРАВЛЕНИИ



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.

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

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 $I_{\text{обр}} \neq 0$, $I_{\text{обр}} = I_0$ (обратный (тепловой) ток): $I_0 = \text{десятки} \div \text{сотни мкА}$ (справочный параметр), причем $I_{0\text{Ge}} \approx 10 I_{0\text{Si}}$.

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

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:**

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

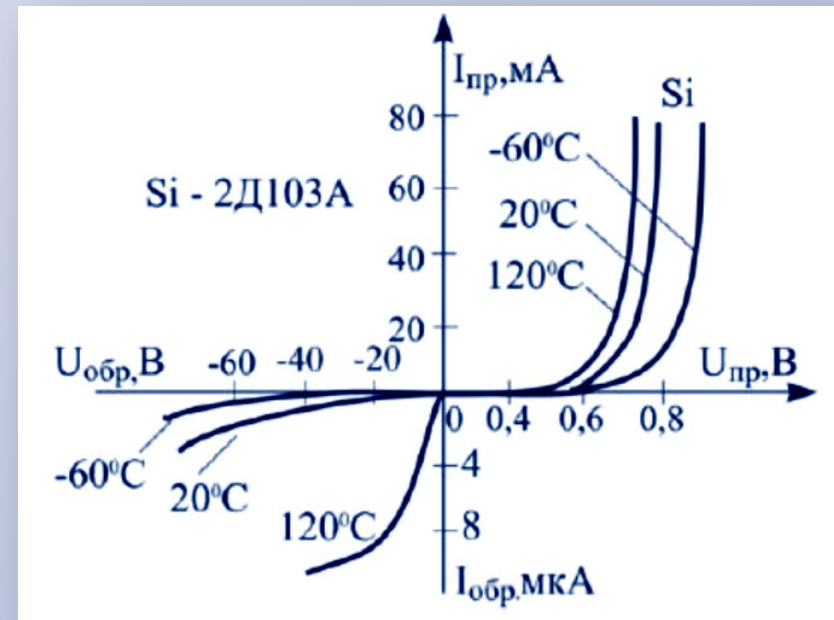
$$I_0(t^\circ) = I_0(t_0^\circ) \cdot 2^{\frac{t^\circ - t_0^\circ}{8}} \quad - \text{Si};$$

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

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

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

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



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

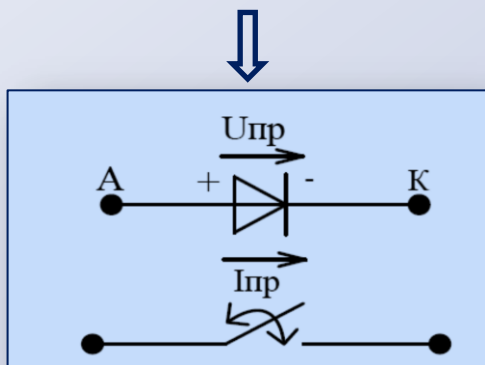
$$\text{ТКН}_{\text{тип}} = (-) 2,5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$$

5. Схемы замещения полупроводниковых диодов

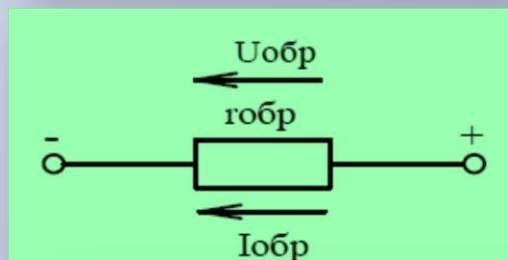
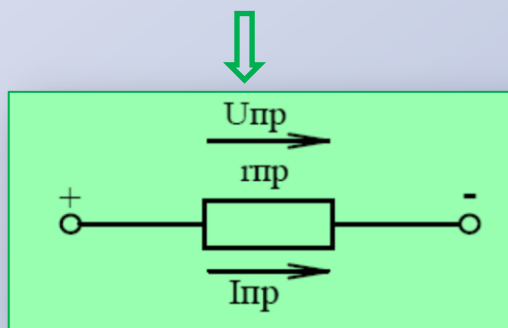
Для построения схемы замещения диода его сложную вольтамперную характеристику аппроксимируют (приближают) прямыми линиями.

ВИДЫ АППРОКСИМАЦИИ ВАХ ДИОДА

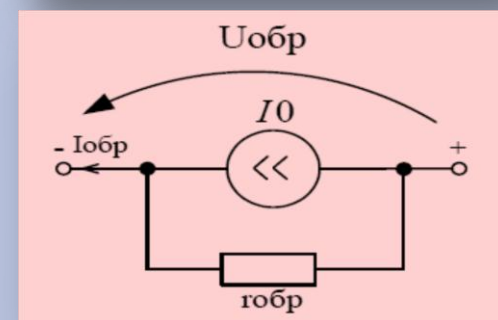
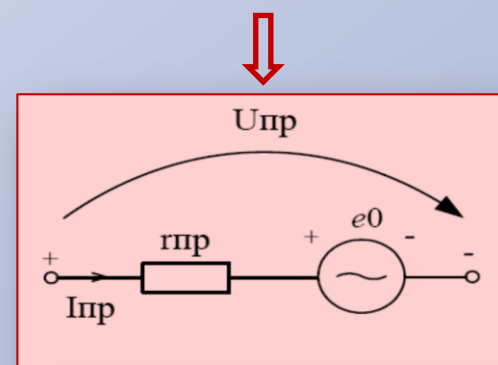
1. Идеальный вентиль



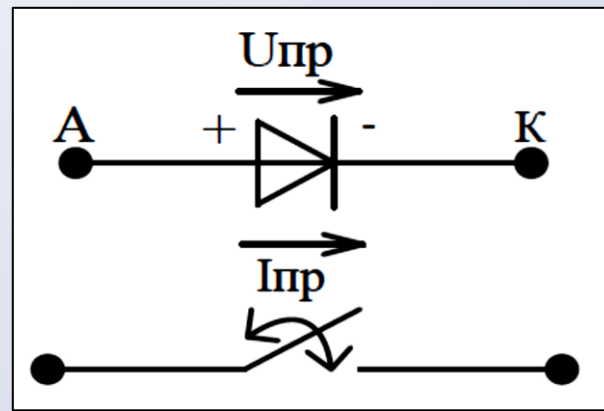
2. Диод- сопротивление



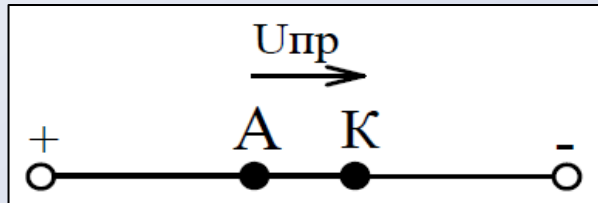
3. «Точная» схема замещения



1. Идеальный вентиль



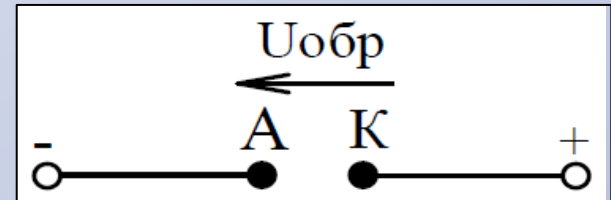
В большинстве практических расчетов **прямым** сопротивлением и **прямым** напряжением *p-n*-перехода можно пренебречь, т.е. прямосмещенный *p-n*-переход представляется эквипотенциальной точкой.



1.1 Диод включен (прямосмещенный диод представляется закороткой)

$$U_d = U_{пр} \cong 0,$$

$$R_d = r_{пр} \cong 0.$$

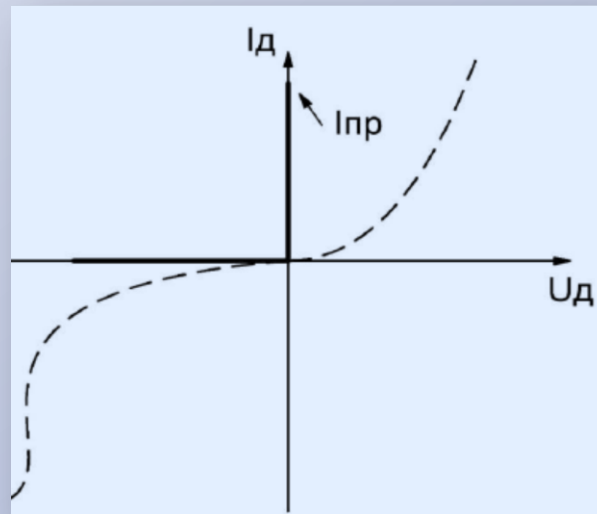


1.2 Диод выключен (обратносмещенный диод представляется разрывом)

$$U_d = U_{обр},$$

$$R_d = r_{обр} \cong \infty,$$

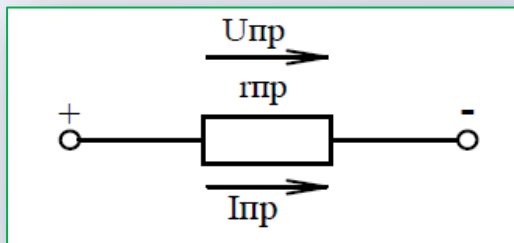
$$I_{обр} = 0.$$



Грубая аппроксимация ВАХ!!!

2. Диод-сопротивление

2.1 $U_d = U_{пр}$



$$I_{пр} = \frac{U_{пр}}{r_{пр}};$$

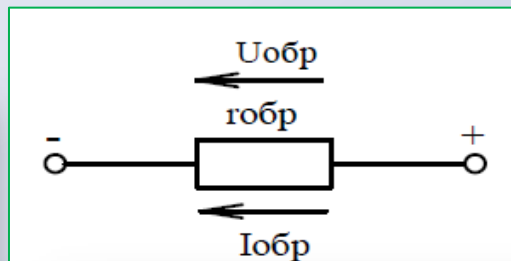
$$R_d = r_{пр};$$

$$r_{пр} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}};$$

Погрешность аппроксимации
меньше, чем в случае
Идеального вентиля!!!

Диод-сопротивление - схема замещения с резистором.

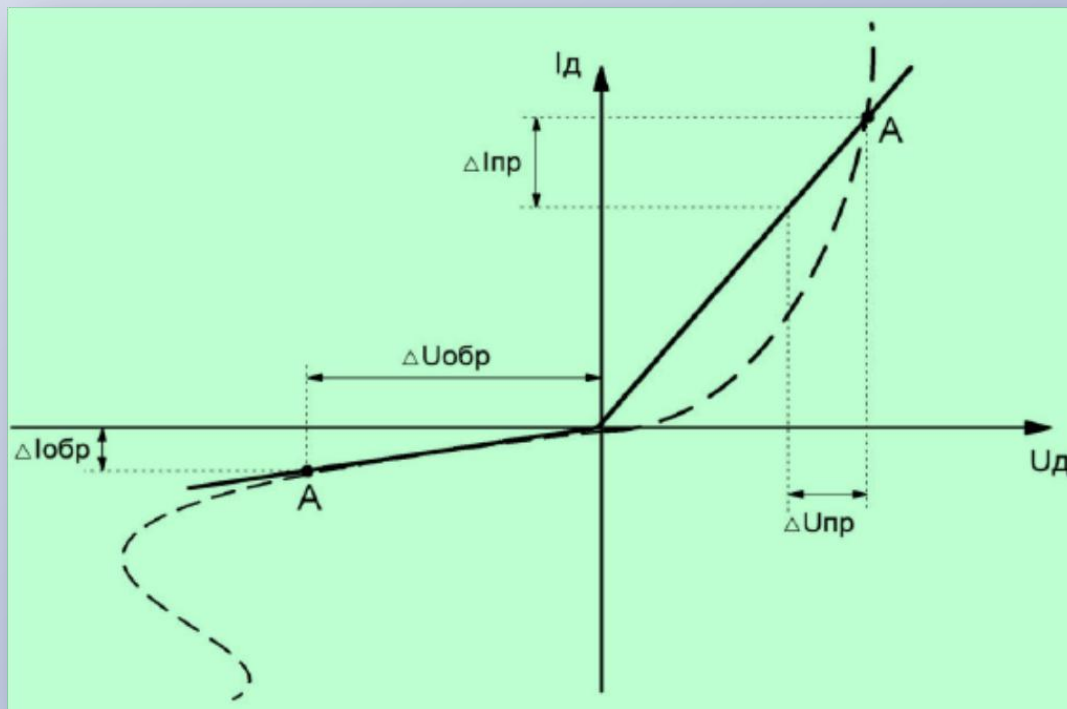
2.2 $U_d = U_{обр}$



$$I_{обр} = \frac{U_{обр}}{r_{обр}};$$

$$R_d = r_{обр}.$$

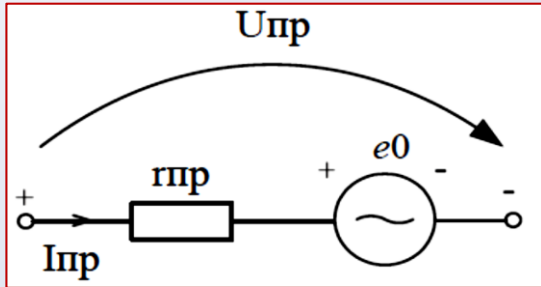
$$r_{обр} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}}.$$



3. «Точная» схема замещения

Применяется если требуется **высокая точность в расчетах.**

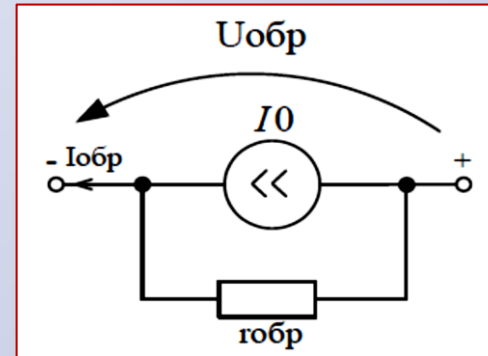
3.1 $U_{\text{д}} = U_{\text{пр}}$



$$r_{\text{пр}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}};$$

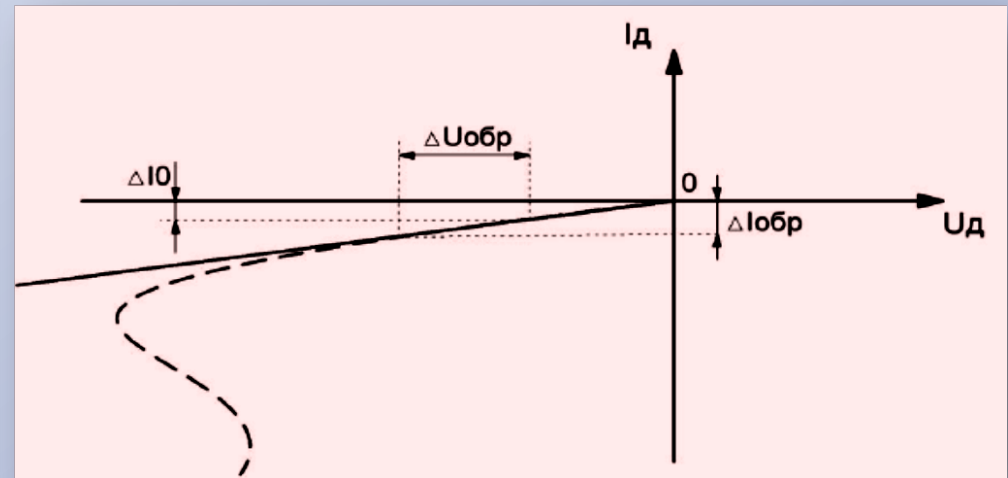
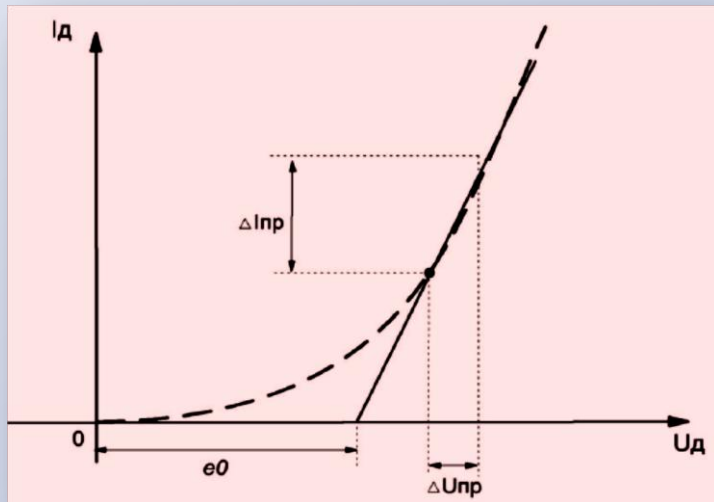
$$I_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}} - e_0}{r_{\text{пр}}}.$$

3.2 $U_{\text{д}} = U_{\text{обр}}$



$$r_{\text{обр}} = \frac{\Delta U_{\text{обр}}}{\Delta I_{\text{обр}}};$$

$$I_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{r_{\text{обр}}} + I_0.$$

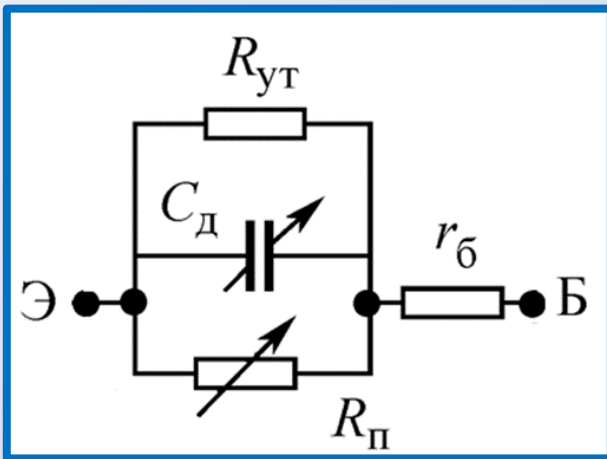


3. «Точная» схема замещения



Эквивалентная схема замещения p-n перехода

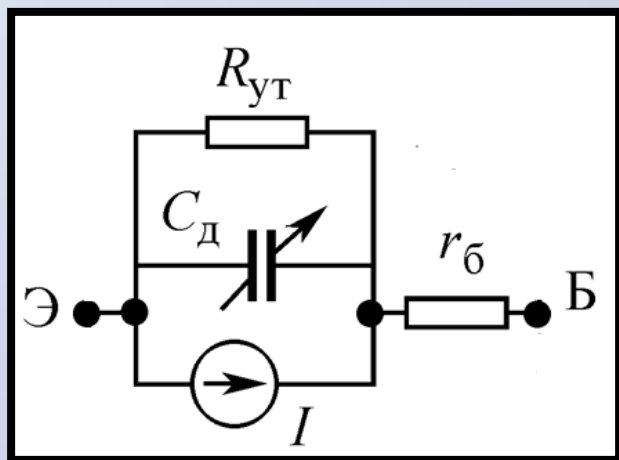
C_d — общая емкость диода, зависящая от режима;
 r_b — объемное сопротивление области базы диода;
 $R_{ут}$ — сопротивление утечки (когда диод включен в обратном направлении).



при малых сигналах: не учитываются нелинейные свойства диода.

$R_n = R_{диф}$ — дифференциальное сопротивление перехода в заданной рабочей точке

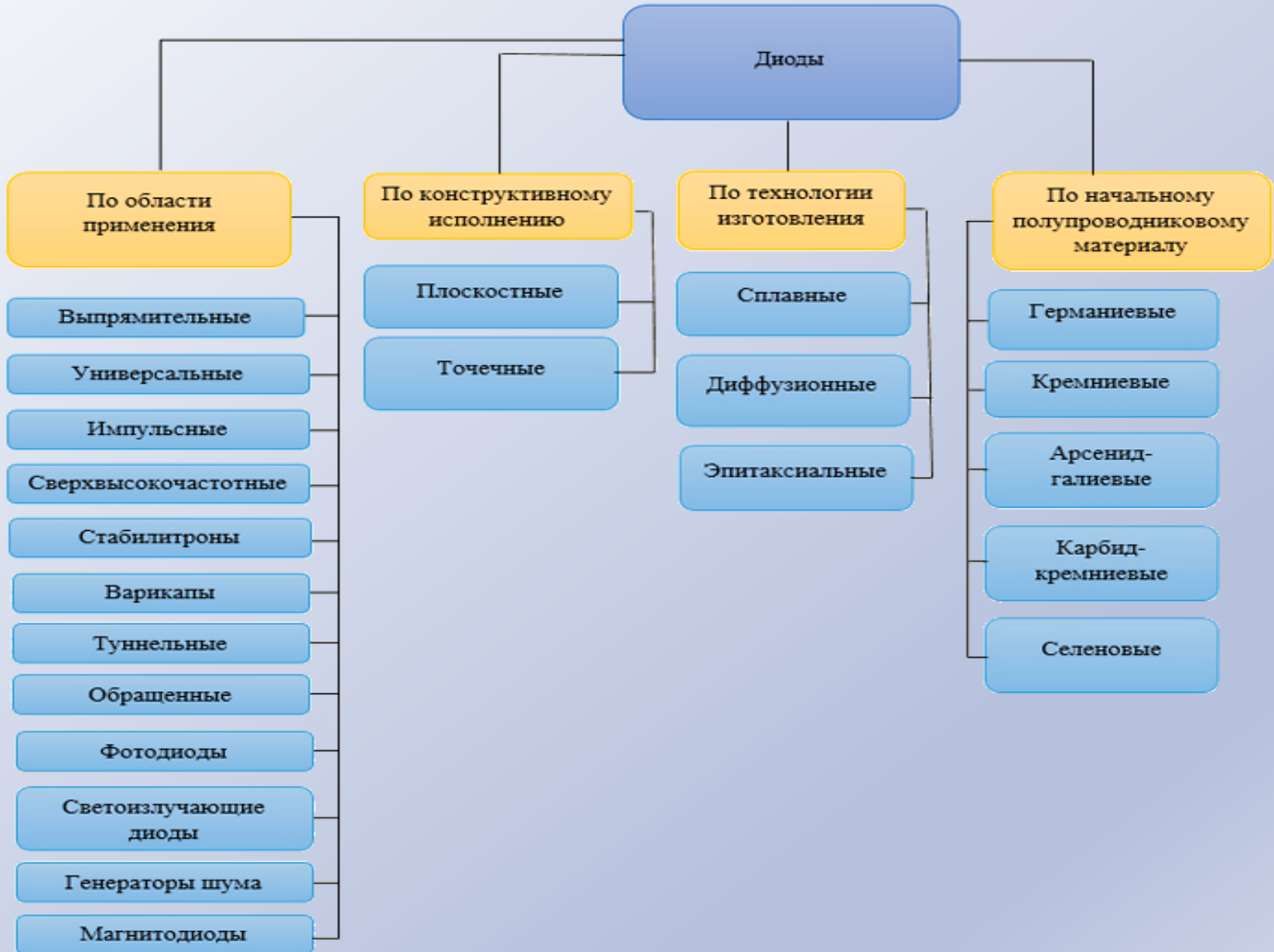
$$R_{диф} = (\Delta U / \Delta I)_{U=const}$$

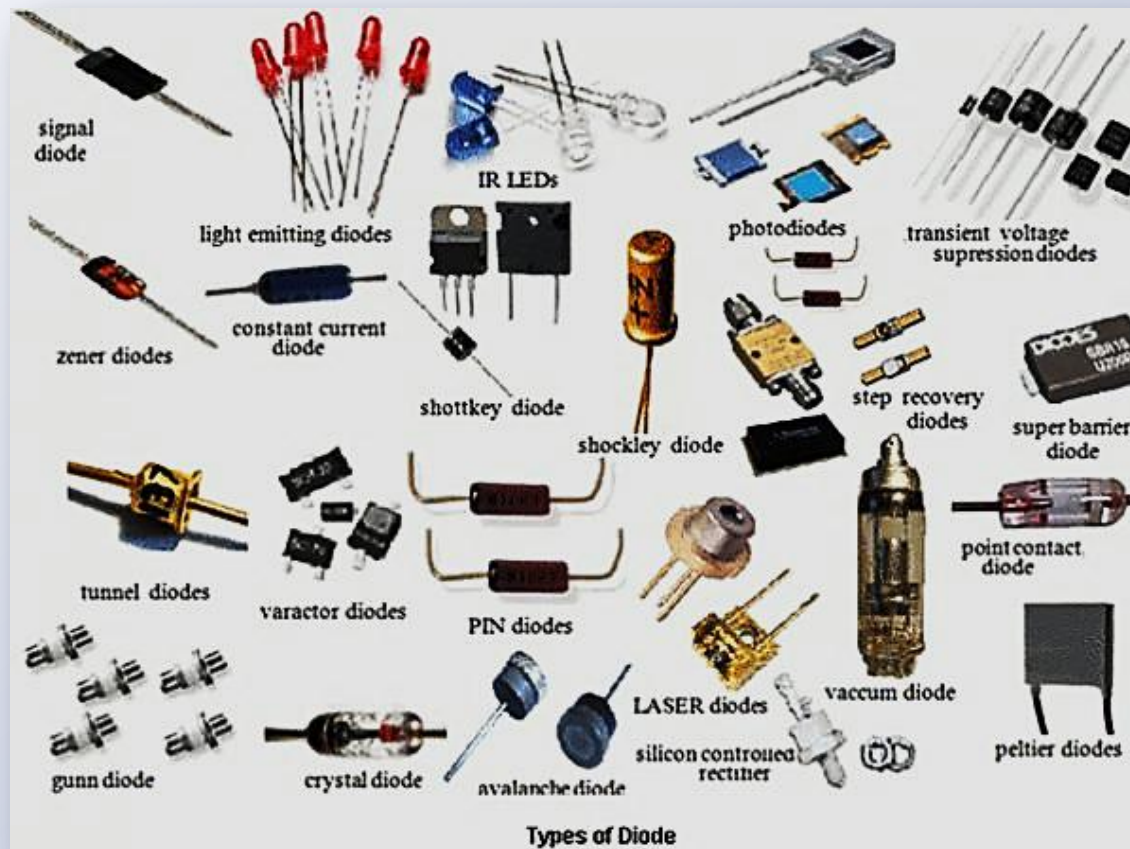


при больших сигналах учитывают нелинейные свойства p-n перехода путем замены дифференциального сопротивления на зависимый источник тока

$$I = I_0(e^{U/Vt} - 1).$$

6. Классификация диодов





ДИОДЫ

По мощности

По частоте

маломощные

средней мощности







мощные

низкочастотные

высокочастотные

СВЧ

УГО диодов

 <p>Общее обозначение (диоды выпрямительные, универсальные, импульсные и т.п.)</p>	 <p>Варикап</p>	
 <p>Стабилитрон односторонний</p>	 <p>Варикапная сборка (два варикапа с общим выводом катода)</p>	
 <p>Стабилитрон двусторонний (двуханодный стабилитрон)</p>	 <p>Двунаправленный диод</p>	
 <p>Ограничитель напряжения односторонний</p>	 <p>Светодиод</p>	
 <p>Ограничитель напряжения двусторонний</p>	 <p>Фотодиод</p>	
 <p>Диод туннельный</p>	Нестандартные обозначения	
 <p>Диод обращенный</p>	 <p>Диод Шоттки</p>	 <p>Двусторонний ограничитель напряжения</p>

7. Маркировка диодов

На первом месте – буква или цифра, означающая материал, из которого изготовлен диод. Может принимать следующие значения:

- Г(1) — германий;
- К(2)—кремний;
- А(3)—арсенид галлия;
- И (4) —индий.

На втором - – класс или группа диода. Они тоже могут иметь разное значение:

Д — выпрямительные;

В — варикап;

А — сверхвысокочастотные;

И — туннельные;

С — стабилитроны;

Ц — выпрямительные столбы и блоки.

На третьем месте располагается цифра, указывающая применение и электрические свойства модели.

Четвёртое место — числа от 01 до 99 (или буква (от А до Я)), означающее порядковый номер разработки.

Виды маркировок

- Американская — **JEDEC** — Joint Electron Device Engineering Council
- Европейская — **PRO ELECTRON**
- Японская — **JIS** — Japanese Industrial Standard JIS-C-7012

Диоды и стабилитроны. Цветовая маркировка по системе JEDEC (США)					
Цвет <small>цветы (топы)</small>	1-й элемент	2-й элемент	3-й элемент	4-й элемент	5-й элемент
Золотой					
Серебряный					
Черный	0	0	0	0	-
Коричневый	1	1	1	1	A
Красный	2	2	2	2	B
Оранжевый	3	3	3	3	C
Желтый	4	4	4	4	D
Зеленый	5	5	5	5	E
Голубой	6	6	6	6	F
Фиолетовый	7	7	7	7	G
Серый	8	8	8	8	H
Белый	9	9	9	9	I

Пример обозначения	
1N86	

Пример обозначения	
1N237A	

Пример обозначения	
1N1420G	

Диоды. Цветовая маркировка по европейской системе PRO ELECTRON				
Цвет <small>цвета (топы)</small>	1-й элемент	2-й элемент	3-й элемент	4-й элемент
Золотой				
Серебряный				
Черный	AA	X		0
Коричневый			1	1
Красный	BA	S	2	2
Оранжевый			3	3
Желтый		T	4	4
Зеленый		V	5	5
Голубой		W	6	6
Фиолетовый			7	7
Серый		Y	8	8
Белый		Z	9	9

Пример обозначения	
BAT85	

Пример обозначения	

Стабилитроны. Цветовая маркировка по системе JIS-C-7012 (Япония)		
Цвет <small>цветы (топы)</small>	1-й элемент	2-й элемент
Золотой		
Серебряный		
Черный		0
Коричневый	1	1
Красный	2	2
Оранжевый	3	3
Желтый	4	4
Зеленый	5	5
Голубой	6	6
Фиолетовый	7	7
Серый	8	8
Белый	9	9

Пример обозначения	
10 В	

Пример обозначения	
Двойной второй элемент указывает на запятую между цифрами	

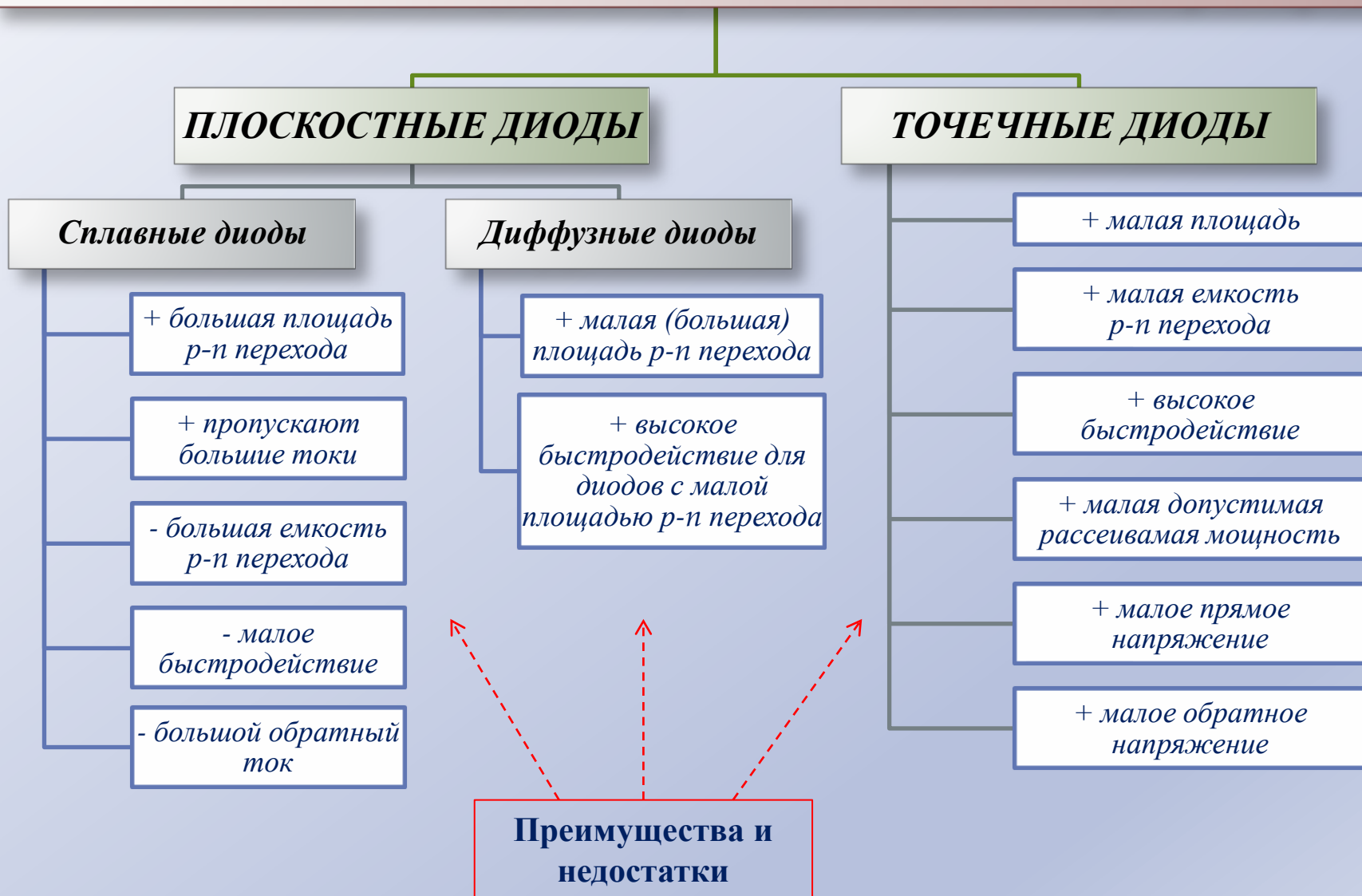
Пример обозначения	
7,5 В	

Пример обозначения	
3,9 В	

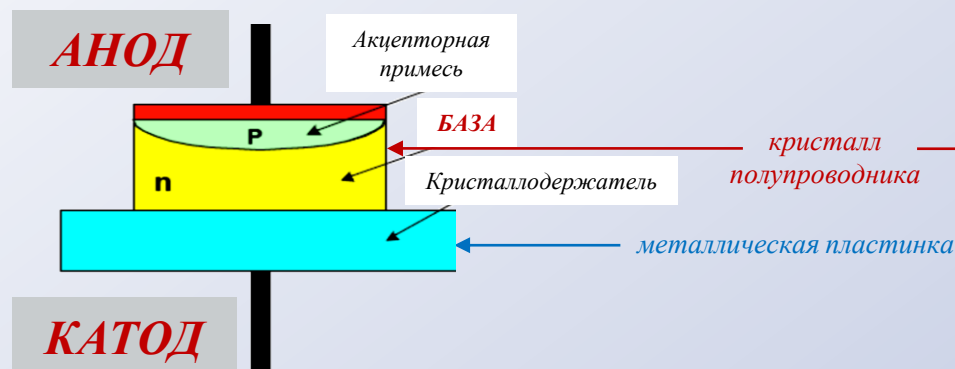
8. Конструкция полупроводниковых диодов

Основой диодов является кристалл полупроводника *n*-типа проводимости, который называется базой

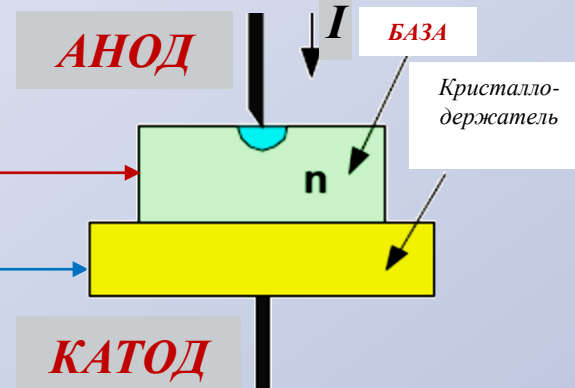
В зависимости от соотношения **толщины базы, площади базы и площади *p-n* перехода**



1) Плоскостной диод



2) Точечный диод



На базу накладывается материал акцепторной примеси и в вакуумной печи при высокой температуре (порядка 500 °С) происходит диффузия акцепторной примеси в базу диода, в результате чего образуется область р-типа проводимости и р-п переход большой плоскости. Вывод от р-области называется **анодом**, а вывод от n-области – **катодом**.

К базе точечного диода подводят вольфрамовую проволоку, легированную атомами акцепторной примеси, и через неё пропускают импульсы тока силой до 1А. В точке разогрева атомы акцепторной примеси переходят в базу, образуя р-область. Получается р-п переход очень малой площади. За счёт этого **точечные диоды** будут **высокочастотными**, но могут работать лишь на **малых прямых токах** (десятки миллиампер).

3) Микросплавные диоды

Получают **путём сплавления микрокристаллов полупроводников р- и n- типа проводимости**. По своему характеру микросплавные диоды будут плоскостные, а по своим параметрам – точечные.

Устройства в которых применяются

Плоскостные диоды

Блоки питания

Сильноточные импульсные устройства

Точечные диоды

Высокочастотные каскады приемных устройств

Слаботочные импульсные устройства с очень короткими импульсами или с высокой частотой следования импульсов

Используются в качестве:

Плоскостные диоды

Детектор звуковых и видеосигналов

Выпрямители в блоках питания



Точечные диоды

Детектор высокочастотных сигналов

Смеситель радиосигнала с сигналом гетеродина для выделения промежуточной частоты

УГО диодов

Диоды точечные	Выпрямительные	
	СВЧ-диоды	
Диоды плоскостные	Выпрямительные	
	Стабилитроны	
	Туннельные	
	Варикапы	
	Обращенные	
	Светодиоды	
	Фотодиоды	