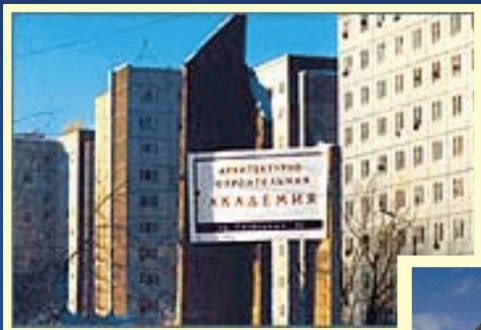




ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**Сибирский федеральный университет**



Н. М. Егоров, А.А. Баскова

# Физические основы электроники

# План лекционного курса

- Модуль 1

Материалы электронной техники  
и их электрофизические свойства

- Модуль 2

Полупроводниковые приборы: физические  
основы работы, характеристики, параметры,  
модели, применение

- Модуль 3

Основы технологии микроэлектронных  
изделий и элементы интегральных схем

- Модуль 4

Приборы вакуумной электроники  
Перспективы развития электроники



# Направления развития электроники



Основные направления развития электроники



# Электронная и дырочные проводимости

Вещества по их способности проводить электрический ток можно разделить на:

- 1 – проводники;
- 2 – полупроводники;
- 3 – изоляторы

Хорошими проводниками являются металлы благодаря тому, что электроны внешних оболочек их атомов могут свободно перемещаться внутри металла, образуя так называемый «электронный газ».

Число «свободных» электронов, которые называют электронами проводимости, в единице металла составляет

$$\approx 10^{19} \text{эл/см}^3$$

У изоляторов концентрация свободных электронов очень мала

У проводников она сильно зависит от температуры

$$\approx 10^{-2} \text{эл/см}^3$$

## Электронная и дырочные проводимости

Для изготовления полупроводниковых приборов наиболее широко применяются германий, кремний, а также арсенид галлия.

Кристаллическая решетка кремния и германия имеет объемную структуру, но на рис. представлена плоской.

Ядра обладают положительным зарядом  $+4$ , который уравнивается отрицательными зарядами четырех электронов. Вместе с электронами соседних атомов они образуют ковалентные связи.

На внешней оболочке атома – 4 своих и 4 электрона, заимствованных у четырех соседних атомов.

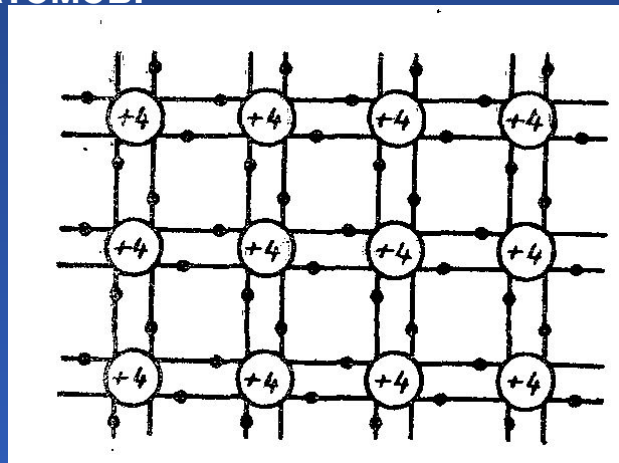
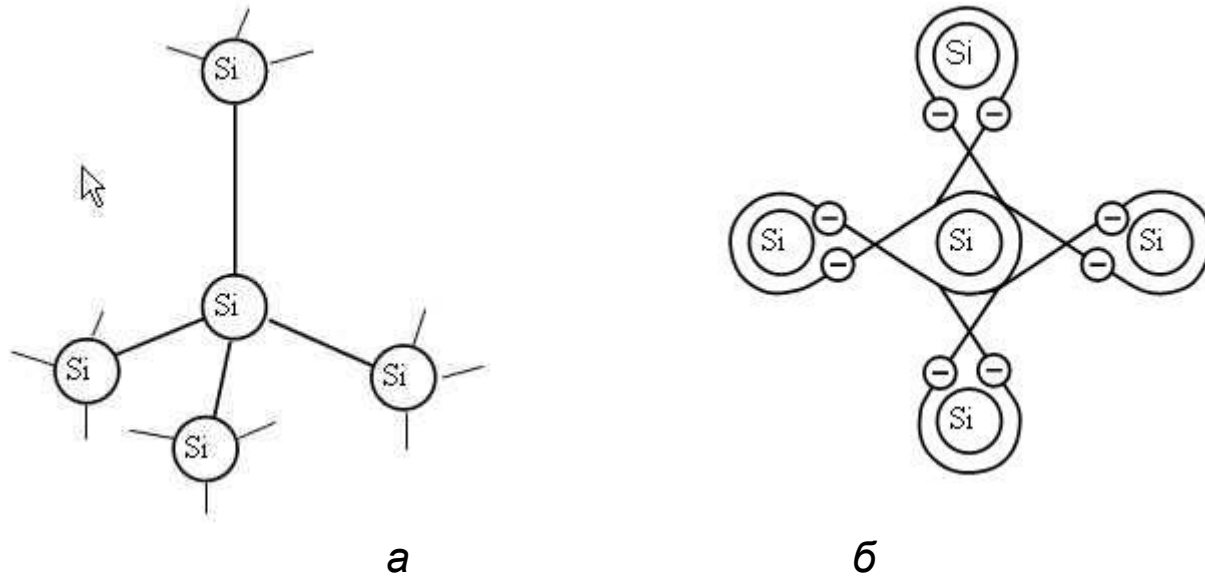


Рис. Кристаллическая решетка кремния и германия в плоскостном изображении



# Кристаллическая структура и типы межатомных связей полупроводников

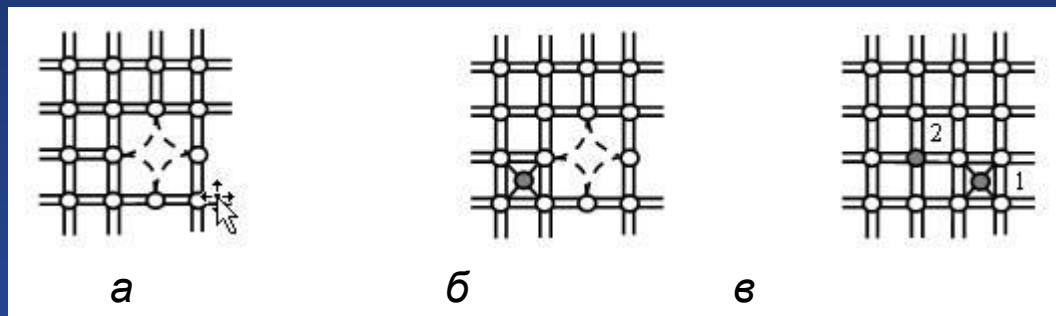


Кристаллическая решетка (а) и структура связей (б)  
между атомами кремния

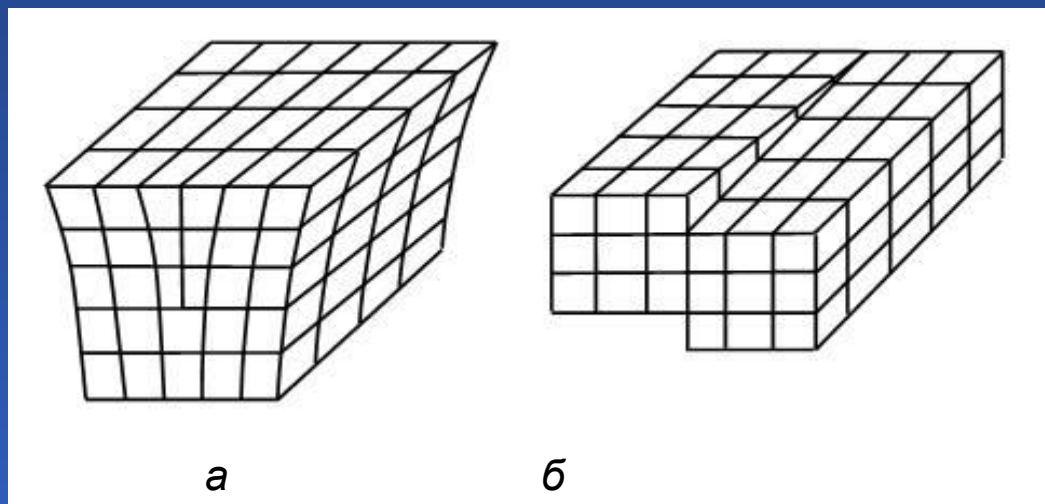


# Дефекты кристаллической решетки

Точечные дефекты кристалла:  
*а* – дефект по Шоттки; *б* – дефект по Френкелю; *в* – примесные атомы



Дислокации в кристаллической  
решетке: *а* – линейные;  
*б* – винтовые





## Электронная и дырочные проводимости

При температуре, отличной от абсолютного нуля, атомы решетки колеблются и некоторые электроны получают энергию, достаточную для того, чтобы оторваться от своего атома. Образуется электрон проводимости и дырка – разорванная связь.

За счет тепловых колебаний решетки генерируется электронно-дырочная пара. Движение свободного электрона вызывает движение дырки.

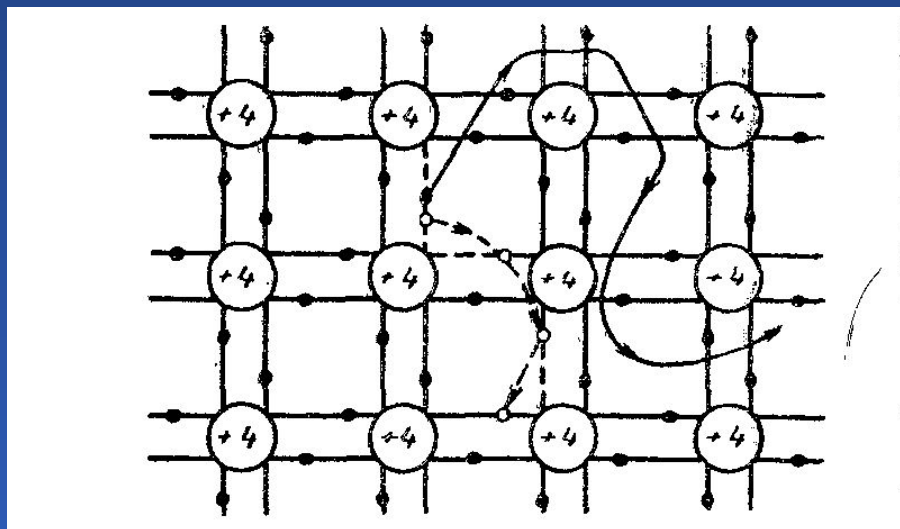


Рис. Движение свободного электрона и дырки в полупроводнике. Сплошная – движение электрона, штриховая – движение дырки

# Электронная и дырочные проводимости

При температуре, отличной от абсолютного нуля, атомы решетки колеблются и некоторые электроны получают энергию, достаточную для того, чтобы оторваться от своего атома. Образуется электрон проводимости и дырка – разорванная связь.

За счет тепловых колебаний решетки генерируется электронно-дырочная пара. Движение свободного электрона вызывает движение дырки.

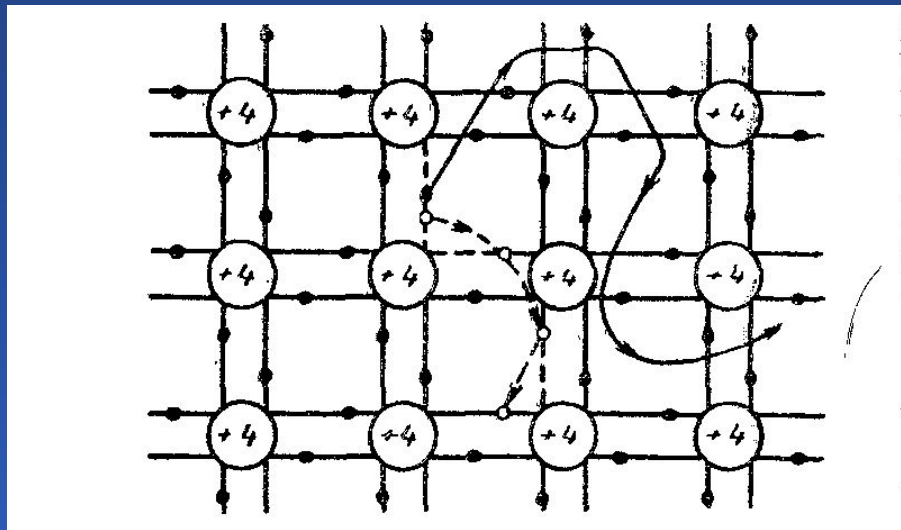


Рис. Движение свободного электрона и дырки в полупроводнике. Сплошная – движение электрона, штриховая – движение дырки

# Электронная и дырочные проводимости

Полупроводник, который не имеет примесей называется собственным полупроводником.

В собственном полупроводнике концентрация электронов  $n_i$  и дырок  $p_i$  одинакова.

$$n_i^2 = n_i p_i = AT^3 \exp(-\Delta E_{g0}/kT),$$

где  $A$  — коэффициент пропорциональности;  $T$  — абсолютная температура;  $\Delta E_{g0}$  — ширина запрещенной зоны при 0 К, равная минимальной энергии, которую нужно сообщить электрону, чтобы вывести его из валентной зоны в зону проводимости;  $k$  — постоянная Больцмана.

Для кремния  $\Delta E_{g0} = 1,21$  эВ, а для германия — 0,78 эВ. При комнатной температуре ( $T = 290$  К) для кремния  $n_i \approx 10^{10}$ , а для германия  $n_i \approx 2 \cdot 10^{13}$  эл/см<sup>3</sup>.

# Электронная и дырочные проводимости

Способность электронов и дырок двигаться под воздействием электрического тока называют **ПОДВИЖНОСТЬЮ**.

Удельная проводимость полупроводника

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p,$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — подвижность электронов и дырок;  $q$  — заряд электрона;  $n$  и  $p$  — концентрация электронов и дырок.

Подвижность электронов в кремнии и германии в 2—2,5 раза выше, чем подвижность дырок, поэтому проводимость собственного полупроводника носит в основном электронный характер.

Удельное сопротивление кремния много выше, чем германия. При комнатной температуре (25 °С) кремний имеет удельное сопротивление 2,3 кОм·м, а германий — 0,60 Ом·м.

В отличие от металлов, удельное сопротивление собственных полупроводников при увеличении температуры не растет, а падает.

## Примесные полупроводники

В полупроводниковых приборах широко применяются полупроводники, проводимость которых определяется так называемыми донорными и акцепторными примесями. В качестве донорных примесей используются элементы V группы периодической системы, такие как фосфор, мышьяк и сурьма, в качестве акцепторных примесей применяются элементы III группы: бор, галлий и индий.

При внесении в полупроводник примеси некоторые атомы в его кристаллической решетке замещаются атомами примеси

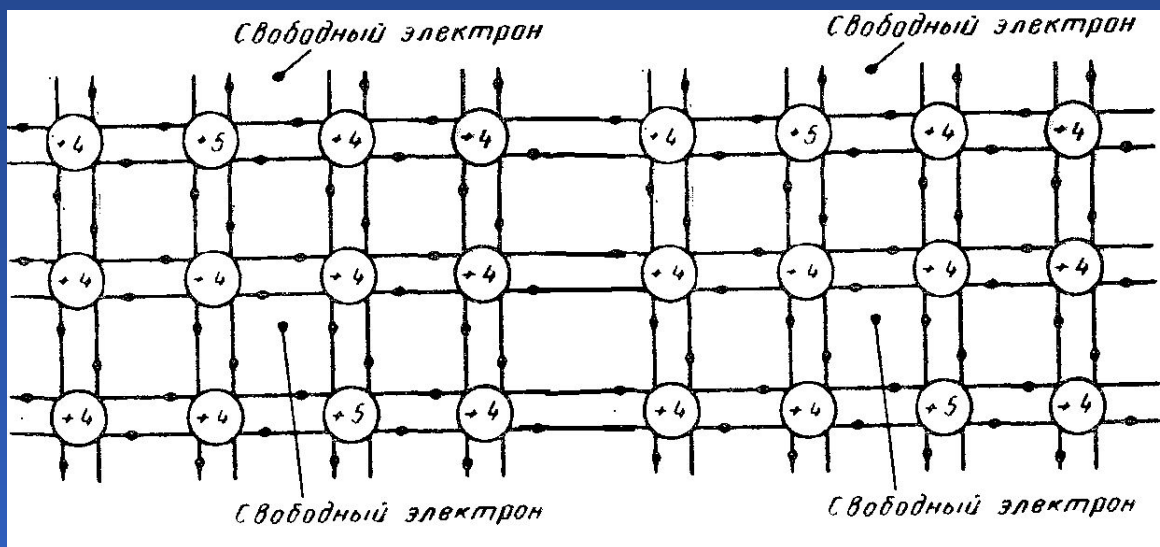


Рис. Кристаллическая решетка с донорной примесью, некоторые атомы заменены атомами примеси. Концентрация электронов возрастает.

# Электронная и дырочные проводимости

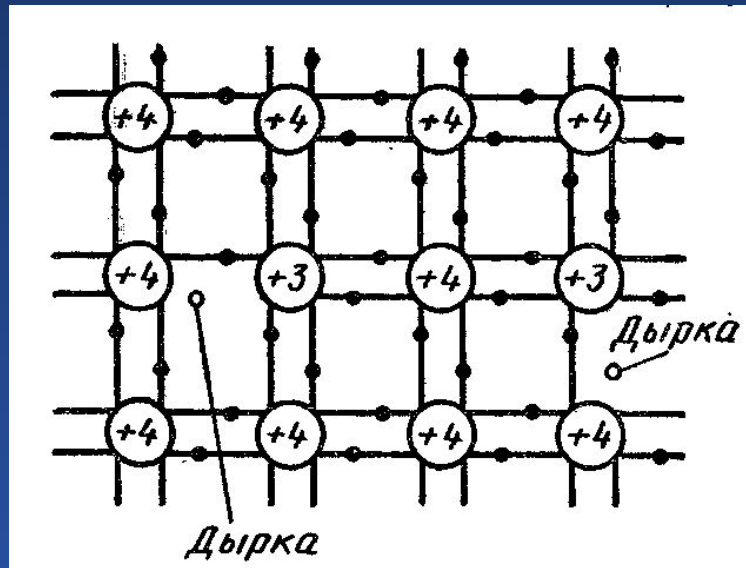


Рис. Кристаллическая решетка с акцепторной примесью, при которой возрастает концентрация дырок.

Концентрация донорной или акцепторной примеси характеризуется числом атомов примеси в единице объема полупроводника. Концентрация донорной примеси обозначается  $N_D$ , а акцепторной —  $N_A$ . Чтобы примесь существенно повлияла на характер проводимости полупроводника, концентрация примеси  $N_D$  или  $N_A$  должна быть на порядок или несколько порядков больше собственной концентрации свободных носителей  $n_i$ .



# Электронная и дырочные проводимости

В этом случае равновесная концентрация электронов  $n_n$  при донорной примеси практически равна концентрации донорной примеси:

$$n_n \approx N_D,$$

а равновесная концентрация дырок  $p_n$  определяется из равенства

$$n_n p_n = n_i^2;$$

$$p_n = n_i^2 / n_n = n_i^2 / N_D.$$

Следовательно, у полупроводника с донорной примесью с увеличением  $n_n$  концентрация дырок становится много меньше концентрации электронов, т. е.

$$p_n \ll n_n.$$

На этом основании полупроводник с донорной примесью называется полупроводником *n*-типа. Электроны в полупроводнике с донорной примесью называются *основными*, а дырки — *неосновными носителями*.

То же справедливо и для полупроводников с акцепторной примесью. Концентрация дырок  $p_p$  в полупроводнике *p*-типа

# Электропроводность металлов и диэлектриков – элементарное представление

В металлах проводимость  $\sigma$  связывает плотность тока  $j$  [А/м<sup>2</sup>] с напряженностью электрического поля  $E$  [В/м] в виде соотношения, известного как закон Ома в дифференциальной форме

$$j = \sigma E.$$

Металлы очень хорошо проводят электрический ток. При комнатной температуре большинство металлов обладает электропроводностью  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  [Ом<sup>-1</sup>\*м<sup>-1</sup>].

Проводимость диэлектриков (изоляторов) настолько мала, что составляет величину порядка  $10^{-16}$  [Ом<sup>-1</sup>\*м<sup>-1</sup>].



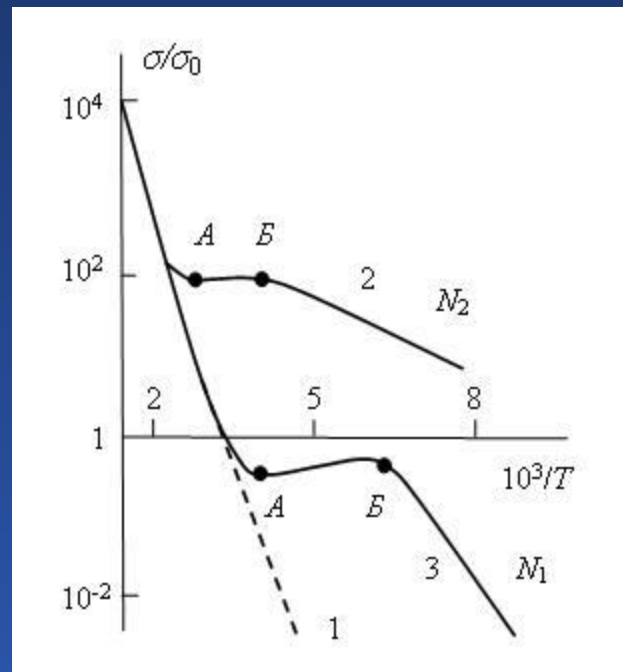


# Электропроводность полупроводников

Проводимость полупроводника  $\sigma$  определяется суммой электронной  $\sigma_n$  и дырочной  $\sigma_p$  компонент проводимости:  $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$ ,  
 Величина электронной и дырочной компонент в полной проводимости определяется классическим соотношением:

$$\sigma_n = \mu_n n_0 q; \quad \sigma_p = \mu_p p_0 q,$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок соответственно.



Зависимость относительной удельной проводимости кремния от температуры:  
 1 – собственный кремний;  
 2, 3 – примесный кремний



# Дрейф носителей заряда в полупроводниках

$$F = eE,$$

где  $e$  – заряд электрона;

$E$  – напряженность электрического поля;

$$a = \frac{E}{m} = \frac{eE}{m},$$

$m$  – масса носителя.

Двигаясь без столкновений, носитель за время  $t$  приобретает скорость в направлении поля:

$$v = at = \frac{eE}{m}t,$$

$$v = \frac{e\tau_0}{m}E,$$

$v$  – средняя скорость, приобретаемая носителем;

$\tau_0$  – среднее время между столкновениями.



# Дрейф носителей заряда в полупроводниках

Средняя скорость направленного движения свободных носителей заряда в кристалле, или *скорость дрейфа*, пропорциональна напряженности электрического поля. Коэффициент пропорциональности носит название *подвижность*

$$\mu = \frac{e\tau_0}{m} \quad v = \mu E \quad |\mu| = [m^2/(В \cdot с)]$$

Плотность дрейфового тока электронов:

$$j_{др\ n} = evw = en\mu_n E, \quad \text{где } n - \text{ концентрация свободных электронов.}$$

Суммарная плотность дрейфового тока:

$$j_{др} = j_{др\ n} + j_{др\ p} = en\mu_n E + ep\mu_p E.$$



# Диффузия носителей заряда в полупроводниках

Явление диффузии – от латинского *diffusio* (разлитие) – характерно не только для жидкостей и газов, но и для твердых тел.

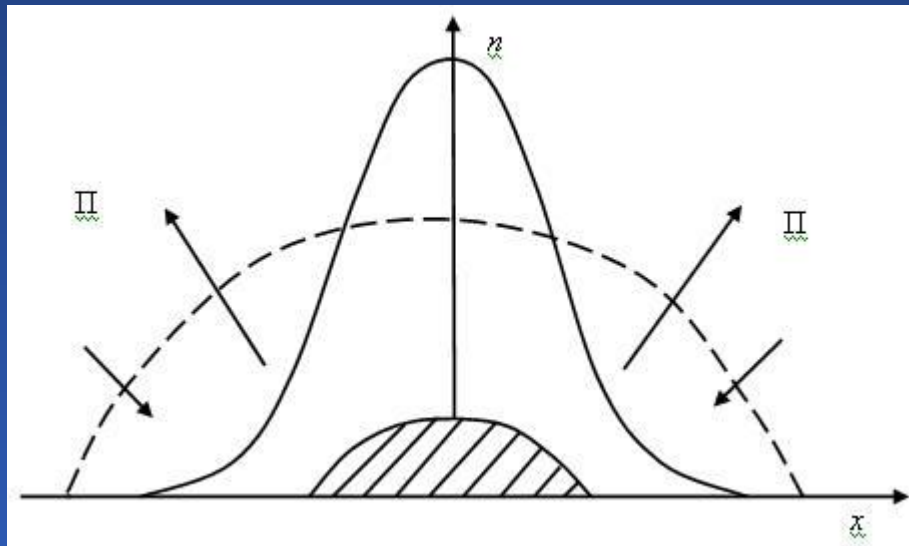


Рис. 1.22. Распределение молекул одеколона над каплей



# Диффузия носителей заряда в полупроводниках

Диффузионный поток:

$$\Pi = -D \frac{\partial n}{\partial x},$$

где  $n$  – концентрация носителей;  
 $D$  – коэффициент диффузии.

$$|\Pi| = 1/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

$$|D| = \text{м}^2/\text{с}$$

Коэффициент диффузии зависит от:

$l$  – длина свободного пробега молекул,

$v_T$  – тепловая скорость движения молекул,

$\tau_0$  – время между столкновениями.

$$\tau_0 = l / v_T$$



# Диффузия носителей заряда в полупроводниках (продолжение)

$$D = l \cdot v_T$$

Точный расчет дает следующее соотношение:

$$D = \frac{1}{3} l v_T.$$

Плотность диффузионного тока:

$$j_{\text{диф } n} = e\Pi = -eD \frac{\partial n}{\partial x}.$$

Чтобы вычислить диффузионный ток, необходимо знать коэффициенты диффузии электронов и дырок  $D_n$  и  $D_p$ .



# Диффузия носителей заряда в полупроводниках

Коэффициенты диффузии электронов и дырок  $D_n$  и  $D_p$

$$D = \frac{1}{3} v_T^2 \tau_0$$

$$v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$$D\tau = \frac{1}{3} v_T^2 \tau_0 = \frac{kT}{m} \tau_0$$

$$D = \frac{kT}{e} \mu$$



# Диффузия носителей заряда в полупроводниках

Для полупроводника, содержащего свободные электроны и дырки, плотность суммарного диффузионного тока:

$$j_{\text{диф}} = j_{\text{диф } n} + j_{\text{диф } p} = -eD_n \frac{\partial n}{\partial x} + eD_p \frac{\partial p}{\partial x}.$$





## Плотность полного тока

В большинстве полупроводниковых приборов величины токов обусловлены как дрейфовым, так и диффузионным перемещением свободных носителей заряда – электронов и дырок:

$$j = j_{\text{др}} + j_{\text{диф}} = en\mu_n E + ep\mu_p E + eD_n \frac{\partial n}{\partial x} - eD_p \frac{\partial p}{\partial x}.$$



## Уравнение непрерывности

Закон сохранения количества заряда:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div} j,$$

где  $\rho$  – объемная плотность заряда.

Уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} - \frac{1}{q} \operatorname{div} j_p + G_p$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} - \frac{1}{q} \operatorname{div} j_n + G_n$$

Здесь первые члены в правых частях характеризуют процесс рекомбинации частиц ( $p$  и  $n$  – неравновесные концентрации,  $p_0$  и  $n_0$  – равновесные концентрации (концентрации акцепторов и доноров));

$\tau_p$  и  $\tau_n$  – времена жизни неравновесных носителей заряда);

$G_p$  и  $G_n$  характеризуют процессы генерации дырок и электронов под воздействием внешних факторов.



## Уравнение непрерывности (продолжение)

$$\frac{1}{e} \operatorname{div} j_p = \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial x} (j_{\text{др} p} + j_{\text{диф} p}) = p E \frac{\partial p}{\partial x} + p p \frac{\partial E}{\partial x} - D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

$$\frac{1}{e} \operatorname{div} j_n = \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial x} (j_{\text{др} n} + j_{\text{диф} n}) = n E \frac{\partial n}{\partial x} + n n \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$



## Уравнение непрерывности (продолжение)

Уравнения непрерывности в общем виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial E}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + G_p,$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} - \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} - \mu_n n \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + G_n.$$

Уравнения непрерывности преобразуются в *уравнения диффузии*:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}.$$



## Явления в сильных электрических полях

В слабых электрических полях, когда скорость направленного движения мала по сравнению с тепловой, наличие или отсутствие электрического поля не сказывается на характере столкновений носителей заряда с кристаллической решеткой. При этом подвижность является величиной формы: постоянной, не зависящей от напряженности электрического поля  $E$ . Произведение представляет собой удельную электропроводность  $\sigma$  и соответственно можно записать соотношение, известное как закон Ома в дифференциальной форме:

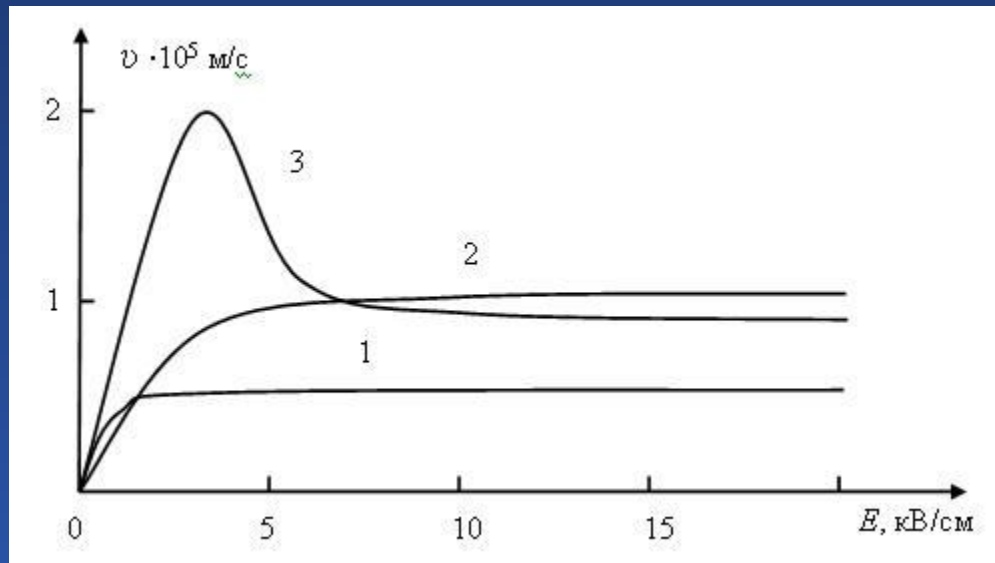
$$j = \sigma E.$$

Во всех практически используемых полупроводниках при комнатной температуре *подвижность в сильных полях падает с ростом напряженности электрического поля  $E$ .*

В очень сильных полях величина подвижности становится обратно пропорциональной напряженности поля:  $\mu \sim 1/E$ . Это означает, что дрейфовая скорость носителей остается постоянной  $u = \text{const}$ .



# Дрейф носителей заряда в сильных электрических полях



Зависимость скорости дрейфа носителей заряда  
от напряженности электрического поля  
в *Ge* (1), *Si* (2) и *GaAs* (3)

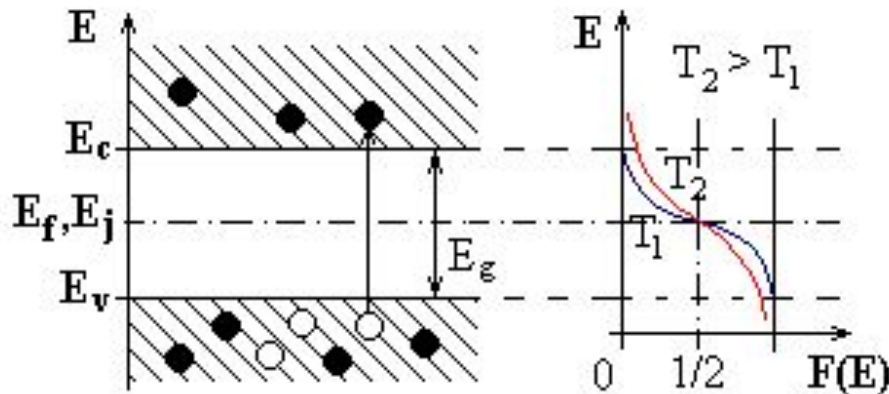


# Статистика носителей заряда в полупроводниках

## Уровень Ферми

Заполнение энергетических уровней в твердом теле.

Любой разрешенный уровень энергии может быть занят электроном или оставаться свободным (свободный уровень в валентной зоне - это дырка). Если при данных условиях уровень обязательно заполнен, то вероятность заполнения данного уровня равна единице, если он пуст - нулю.



**Рис. 1:** Энергетическая диаграмма и функция вероятности заполнения энергетических уровней для собственного полупроводника  $F(E)$

Вероятность заполнения уровня зависит от его энергии, температуры, а, для примесного полупроводника, также от концентрации примеси.

На рис. 1 показан график функции  $F(E)$ , описывающей зависимость вероятности заполнения уровня от соответствующей ему энергии.

# Статистика носителей заряда в полупроводниках

## Уровень Ферми



$F(E) < 1/2$  соответствует уровням слабо заполненным или пустым, а  $F(E) > 1/2$  сильно заполненным уровням. Величину энергии, соответствующую  $F(E) = 1/2$ , можно использовать в качестве критерия при оценке вероятности заполнения уровней. Условно можно принять существование уровня с такой энергией, для которой  $F(E) = 1/2$ , называемого *уровнем Ферми*  $E_f$

Уровень энергии, вероятность заполнения которого электронами равна 0,5 называется уровнем Ферми, по имени известного итальянского физика.





# Статистика носителей заряда в полупроводниках

Одно из фундаментальных положений в физике полупроводников формулируется следующим образом: *уровень Ферми одинаков во всех частях равновесной системы, какой бы разнородной она не была.* Это положение можно записать в виде двух равносильных выражений:

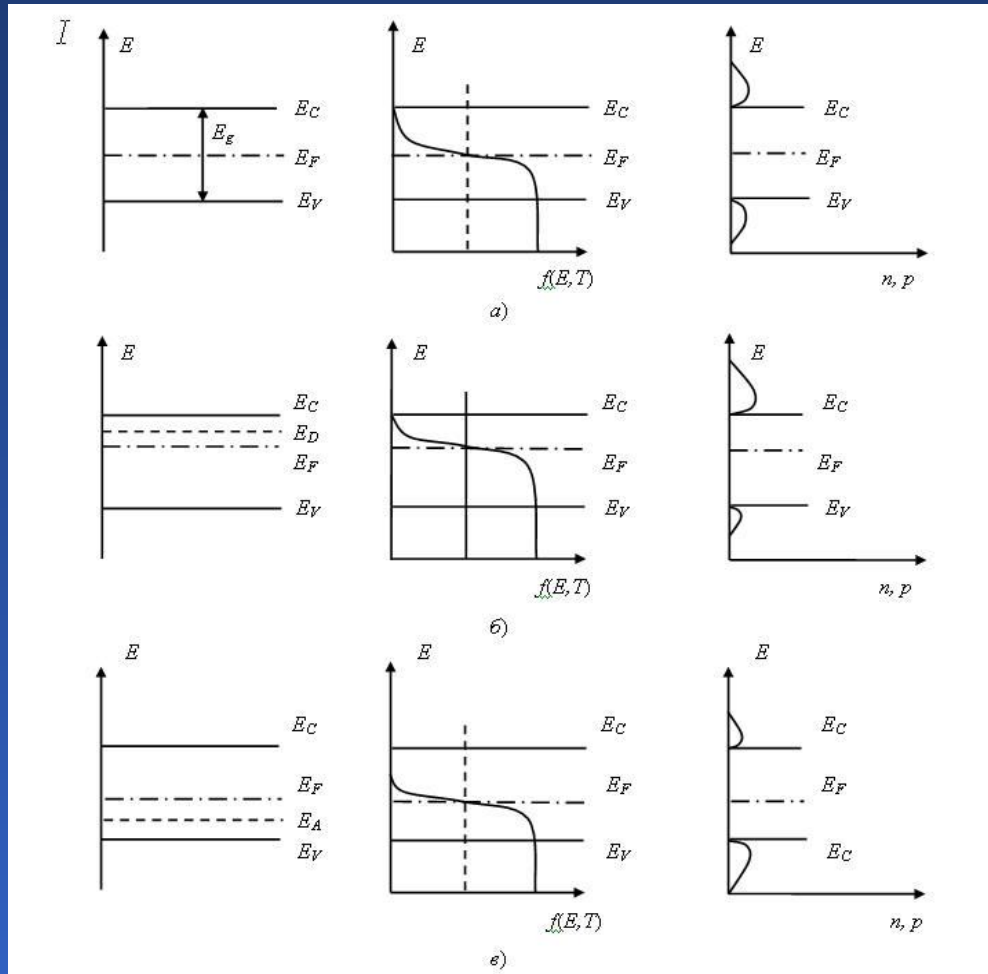
$$\begin{aligned}\phi F &= \text{const}, \\ \text{grad}(\phi F) &= 0.\end{aligned}$$

Из этих условий следует, что если концентрация электронов изменяется с координатой, то возникает электрическое поле:

$$E = \varphi_T \frac{\partial n / \partial x}{n}.$$



# Зонная структура собственных и примесных полупроводников



Зонная диаграмма, функция распределения Ферми – Дирака и концентрация носителей в собственном полупроводнике (а), в полупроводнике  $n$ -типа (б) и в полупроводнике  $p$ -типа (в)



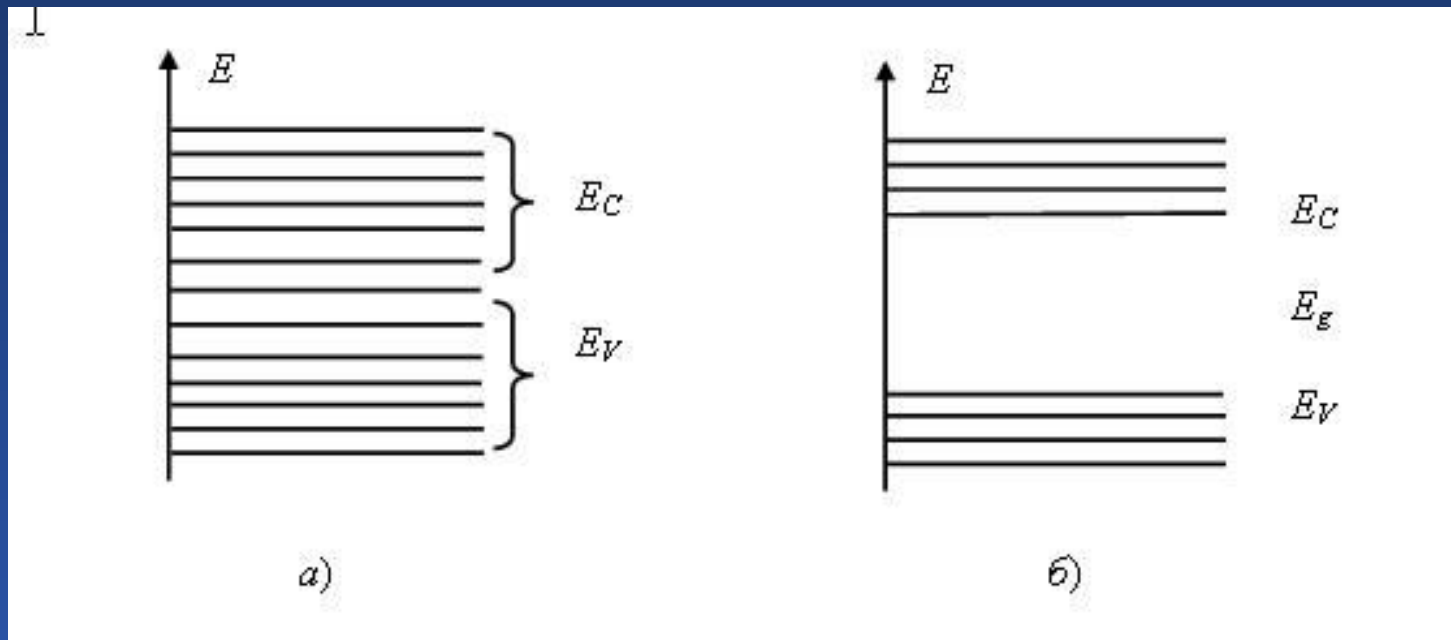
## Зонная структура собственных и примесных полупроводников

Значения собственных концентраций свободных носителей заряда и ряд других важных параметров полупроводников

Полупроводник	InSb	Ge	Si	GaAs
Ширина запрещенной зоны $E_g$ , эВ	0,17	0,72	1,1	1,4
Собственная концентрация $n_i$ , см <sup>3</sup>	$1,3 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^7$
Подвижность электронов $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /В·с	8	0,39	0,13	1
Подвижность дырок $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /В·с	0,07	0,19	0,05	0,04



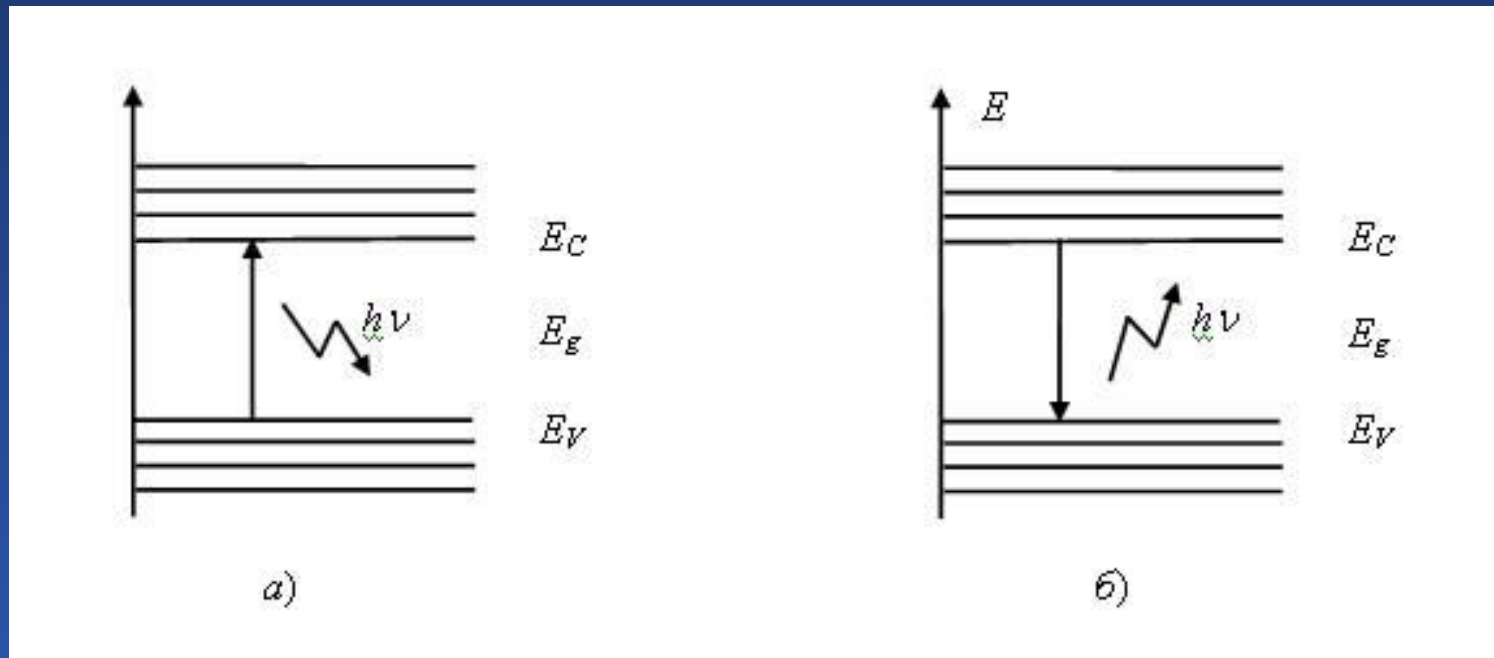
# Зонная структура металлов и диэлектриков



Зонная энергетическая структура  
металла (а) и диэлектрика (б)



# Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках



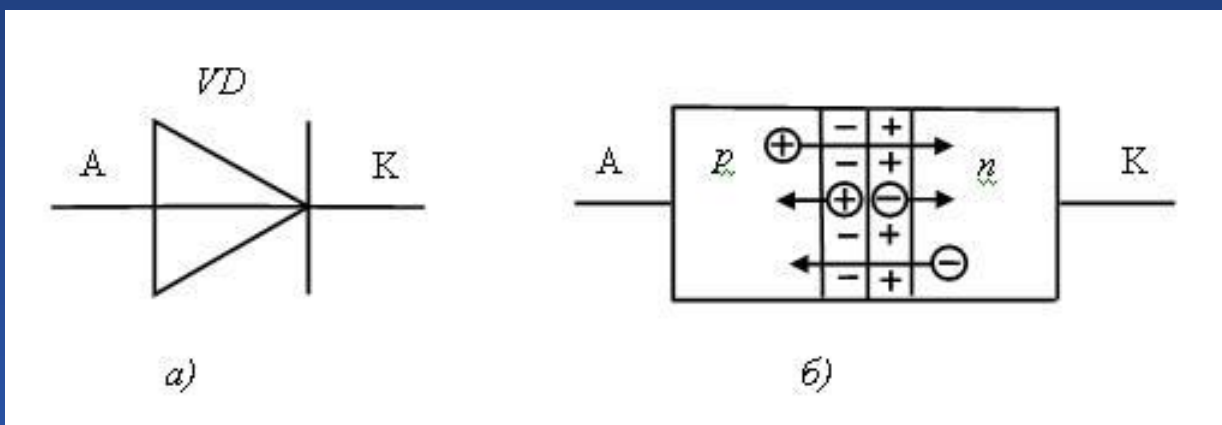
Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводнике





## $p-n$ -переход

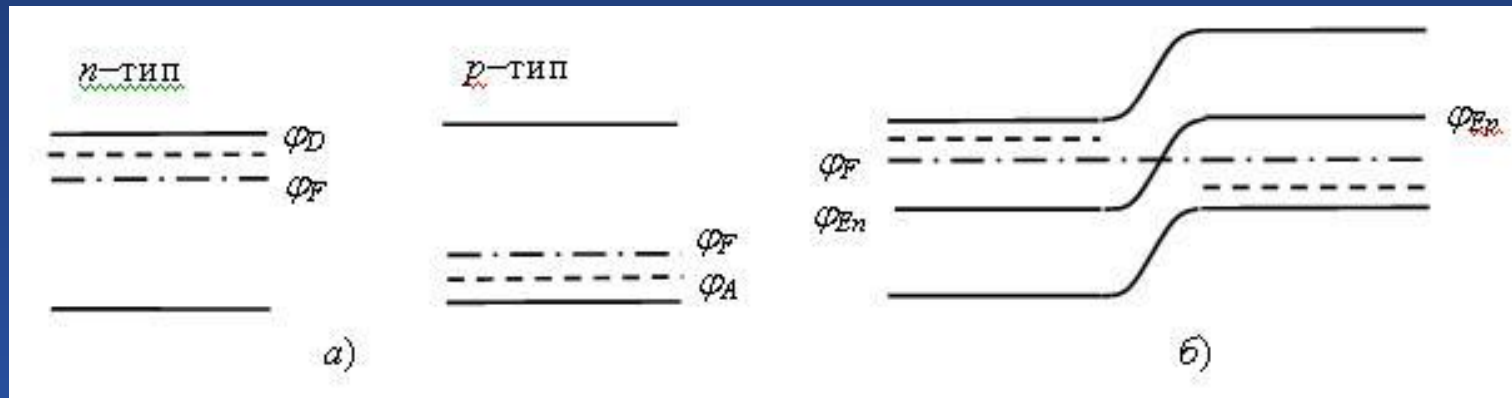
Контакт двух полупроводников одного вида с разным типом проводимости называется *электронно-дырочным* или  $p-n$ -переходом



Условное обозначение (а) и структура (б)  
полупроводникового диода



# Механизм образования $p$ - $n$ -перехода

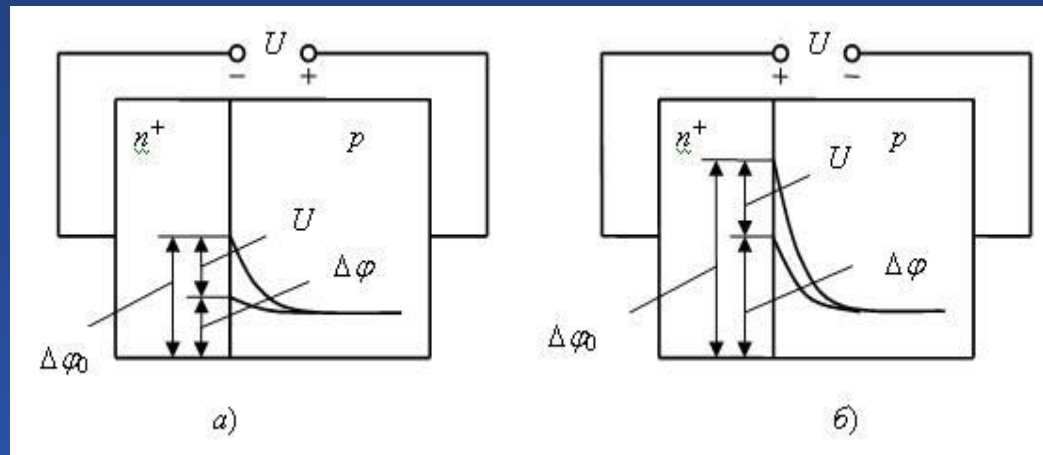


Зонная диаграмма полупроводников  
и  $p$ - $n$ -перехода в равновесном состоянии





## Анализ неравновесного $p$ – $n$ -перехода



Смещение перехода в прямом (а) и обратном (б) направлениях

Избыточные концентрации на границах перехода:

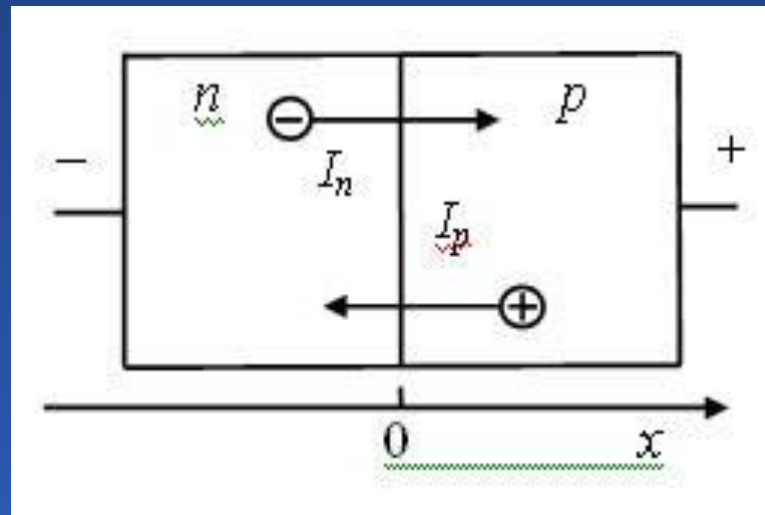
$$\Delta n_p = n_{p0} (e^{U/\phi_T} - 1)$$

$$\Delta p_n = p_{n0} (e^{U/\phi_T} - 1)$$



## Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)

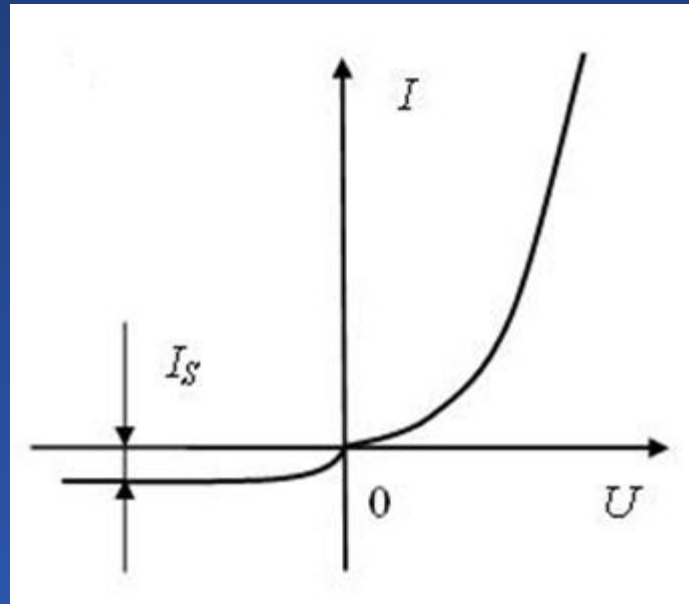
В общем случае ток через переход состоит из электронной и дырочной составляющих, которые с учетом принятых упрощений являются чисто диффузионными .



Структура тока в  $p$ - $n$ -переходе в диффузионном приближении



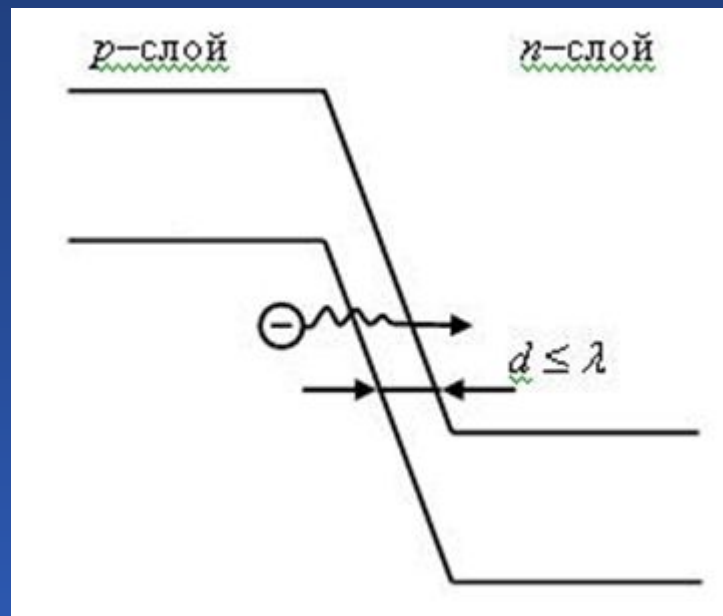
## Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)



Статическая вольт-амперная характеристика идеального диода



# **$p$ – $n$ -переход при прямом и обратном напряжении. Механизмы пробоя $p$ – $n$ -перехода (туннельный, лавинный, тепловой)**



Зонная диаграмма туннельного пробоя



# Разновидности полупроводниковых диодов

Прибор, который имеет два электрода и один выпрямляющий  $p-n$ -переход, называется полупроводниковым диодом.

Полупроводниковые диоды:

- выпрямительные
- импульсные
- обращенные
- туннельные
- лавинно-пролетные
- опорные или зенеровские (стабилитроны)
- с регулируемой емкостью (варикапы) и т. д.



# Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

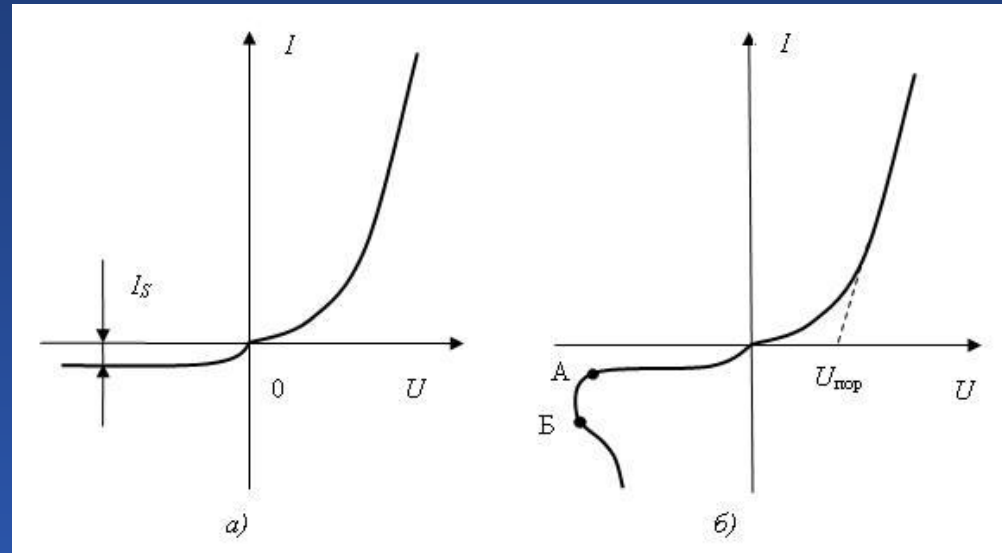
Зависимость тока через диод от напряжения на диоде называется вольт-амперной характеристикой диода. Теоретическое описание ВАХ идеального диода с  $p-n$ -переходом, полученное У. Шокли:

$$I = I_S \left( e^{U/\Phi_T} - 1 \right),$$

где  $U$  – напряжение на  $p-n$ -переходе диода;

$I_S$  – ток насыщения;

$\Phi_T = kT/q$  – тепловой потенциал при  $T = 300$  К,  $\Phi_T = 25$  мВ.



Статические вольт-амперные характеристики идеального  $p-n$ -перехода (а) и реального диода (б)



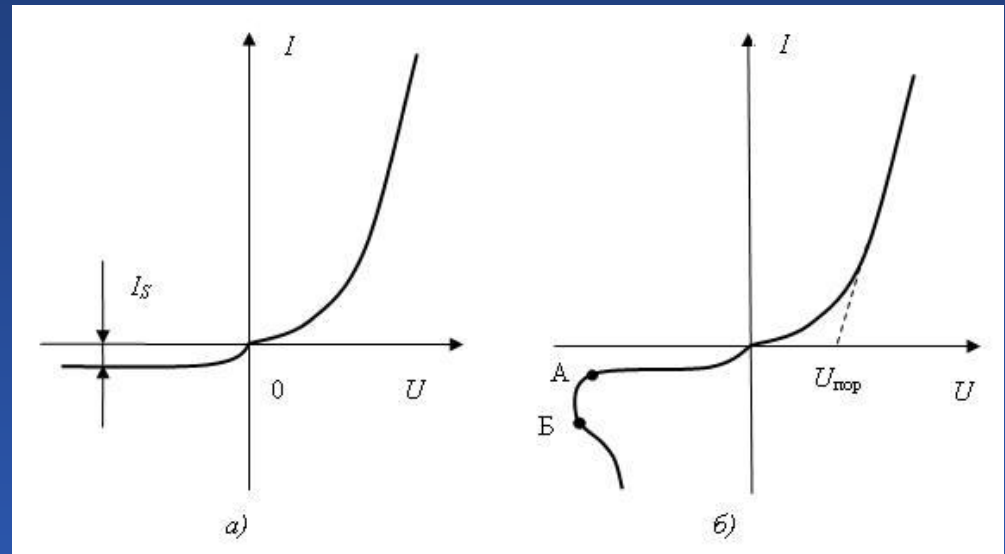
# Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

При положительных и отрицательных напряжениях  $U$ , больших по модулю 0,1 В, ВАХ описывается упрощенным выражением:

$$I = I_S e^{U/\varphi_T}.$$

При протекании большого прямого тока через диод падение напряжения возникает не только на  $p-n$ -переходе, но и на объемном сопротивлении полупроводника  $R$ . Реальная ВАХ описывается выражением

$$I = I_S e^{(U-IR)/\varphi_T}.$$



Статические вольт-амперные характеристики идеального  $p-n$ -перехода (а) и реального диода (б)



# Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

## Параметры полупроводникового диода

- Коэффициент выпрямления  $K_B$ , который определяется как отношение прямого тока к обратному при одинаковой (по модулю) величине прямого и обратного напряжений (например:  $\pm 0,01$ ;  $\pm 0,1$ ;  $\pm 1$  В).

Для идеального диода  $K_B = 1$  при  $U = \pm 0,01$  В. При  $U = \pm 1$  В  $K_B = 2,8 \cdot 10^{20}$

- Максимально допустимый прямой ток  $I_{пр\ max}$ , превышение которого приводит к недопустимому разогреву и тепловому пробую.  $I_{пр\ max}$  справочное значение.
- Свойства полупроводниковых диодов сильно зависят от температуры.





# Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

## Параметры полупроводникового диода (продолжение)

- Максимально допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр max}}$  – важный предельный параметр выпрямительных диодов и составляет для диодов малой мощности десятки-сотни вольт.

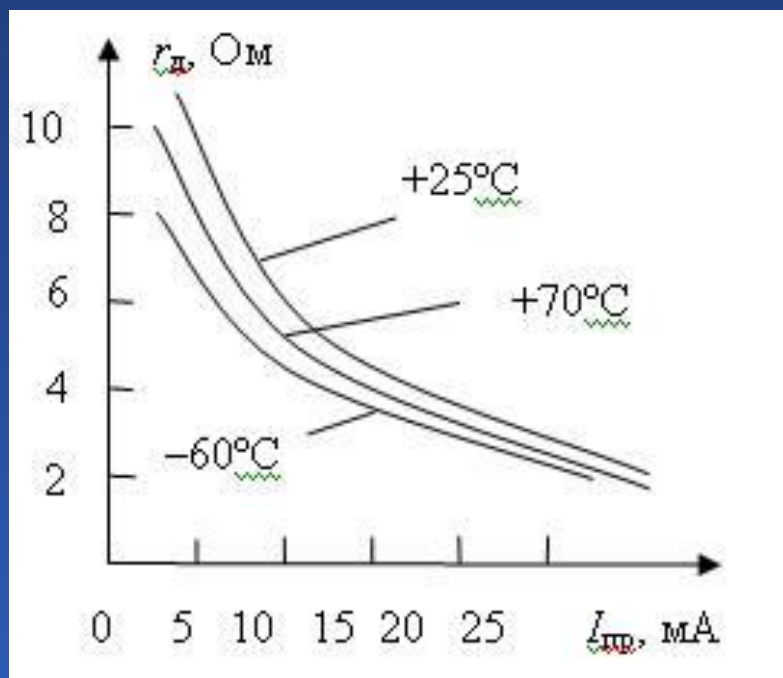
- Дифференциальное сопротивление диода:  $r_d = dU / dI.$

- Статическое сопротивление диода (сопротивление постоянному току):

$$R_{\text{д.ст}} = U / I.$$



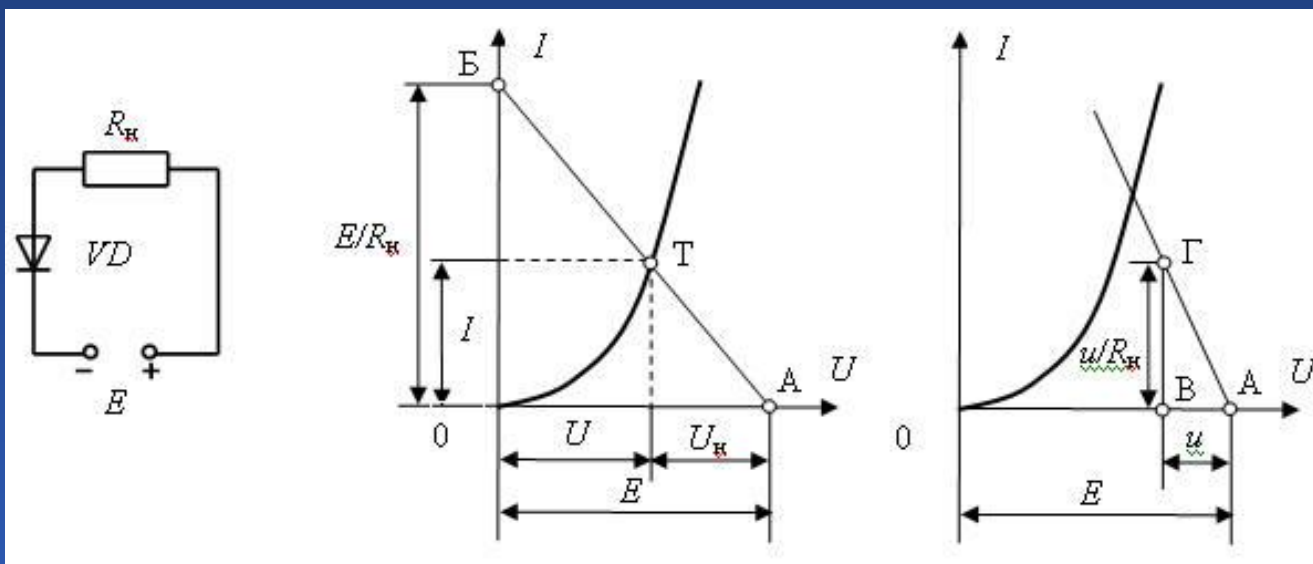
# Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры



Зависимость дифференциального сопротивления диода ГД402  
от величины прямого тока



# Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока



$$I = (E - U)/R_H$$

$$E = U + IR_H$$

Схема включения диода с нагрузкой  
и построение линии нагрузки



# Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

## Выпрямитель

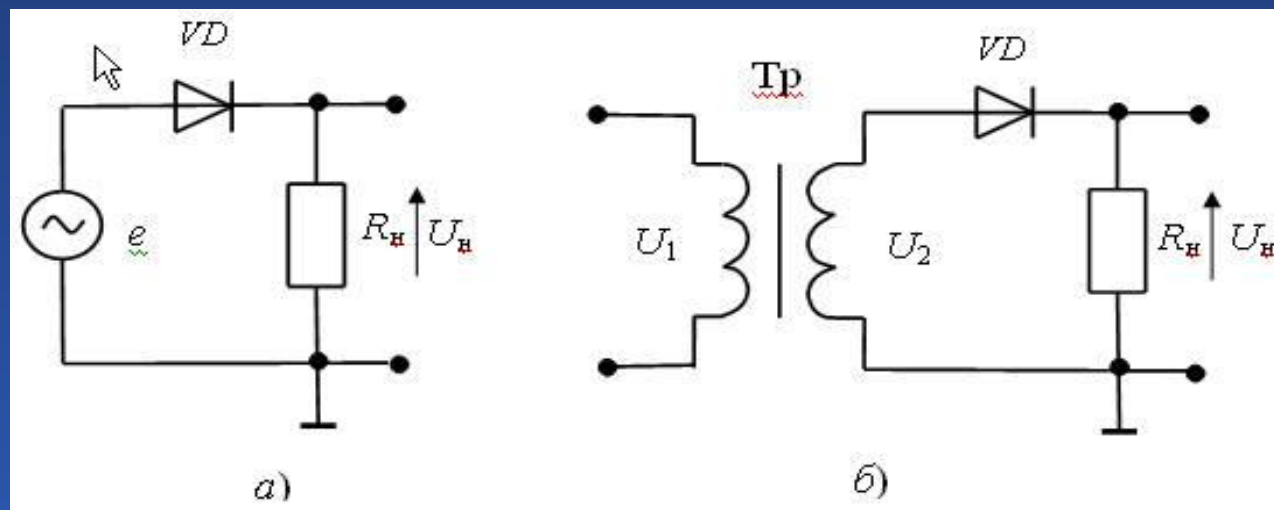
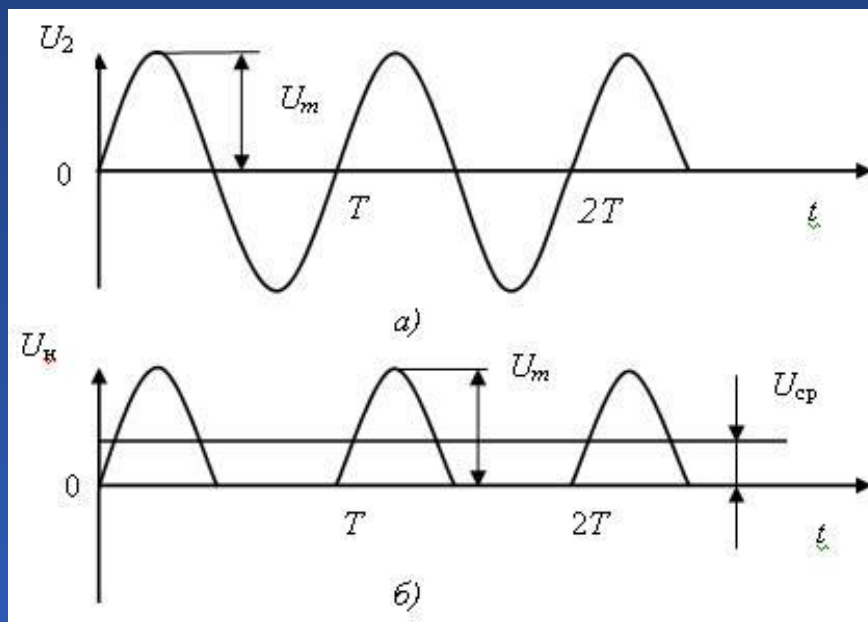


Схема однополупериодного выпрямителя:  
 $e$  – источник ЭДС,  $Tr$  – трансформатор,  $U_1$ ,  $U_2$  – напряжение на первичной и вторичной обмотках трансформатора,  $VD$  – выпрямительный диод,  $R_n$  – сопротивление нагрузки,  $U_n$  – напряжение на нагрузке



# Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

## Выпрямитель



Форма напряжений на входе (а) и выходе (б)  
однополупериодного выпрямителя



# Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

Важным параметром, характеризующим работу выпрямителя, является коэффициент пульсаций:

$$k_{\Pi} = U_{m1} / U_{\text{ср}},$$

где  $U_{M1}$  – амплитуда первой гармоники переменного напряжения на нагрузке;

$U_{\text{ср}}$  – среднее значение напряжения на нагрузке.

$$U_{m1} = 0,5 \cdot U_m = 1,57 \cdot U_{\text{ср}} \quad \text{– для однополупериодного выпрямителя}$$

$$k_n = 1,57$$



# Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

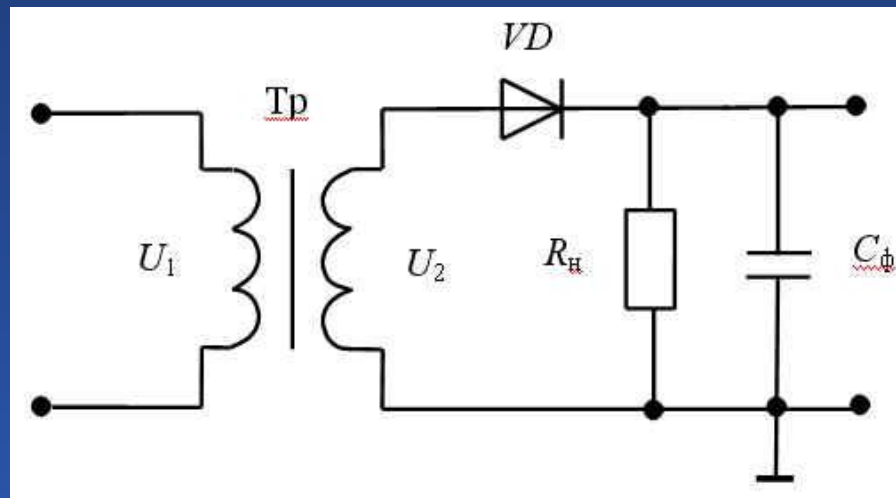


Схема выпрямителя  
со сглаживающим фильтром



# Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

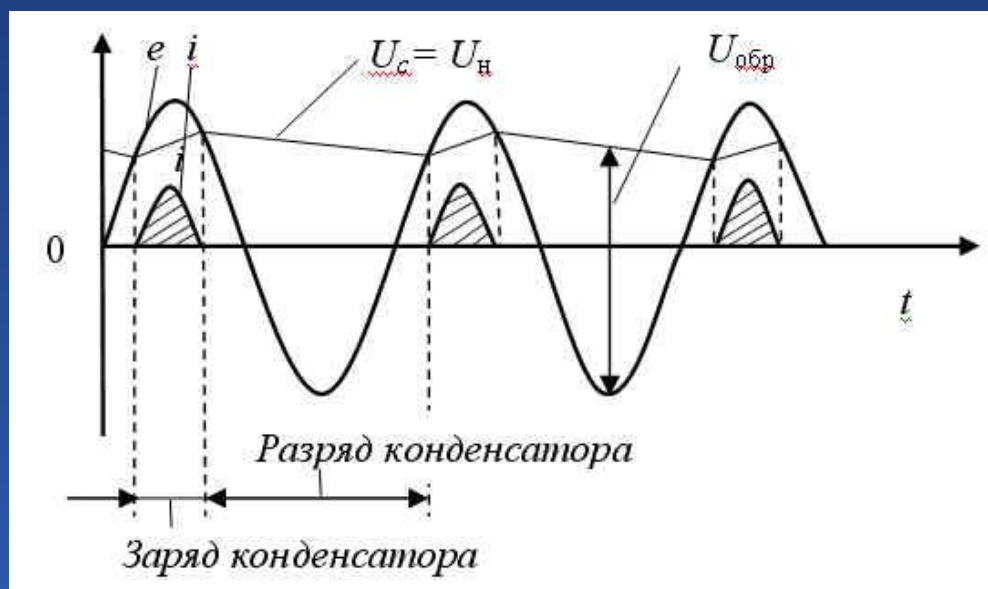


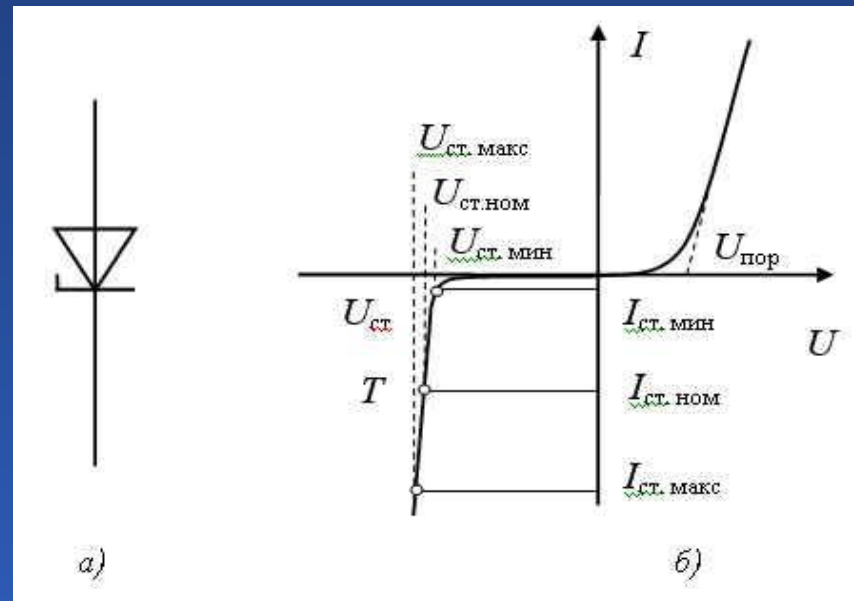
Рис. 2.14. Сглаживание пульсаций  
с помощью конденсатора





## Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, работающий в режиме электрического пробоя. Такой режим возникает при смещении  $p$ – $n$ -перехода в обратном направлении



Схематическое изображение (а) и вольт-амперная характеристика (б) стабилитрона



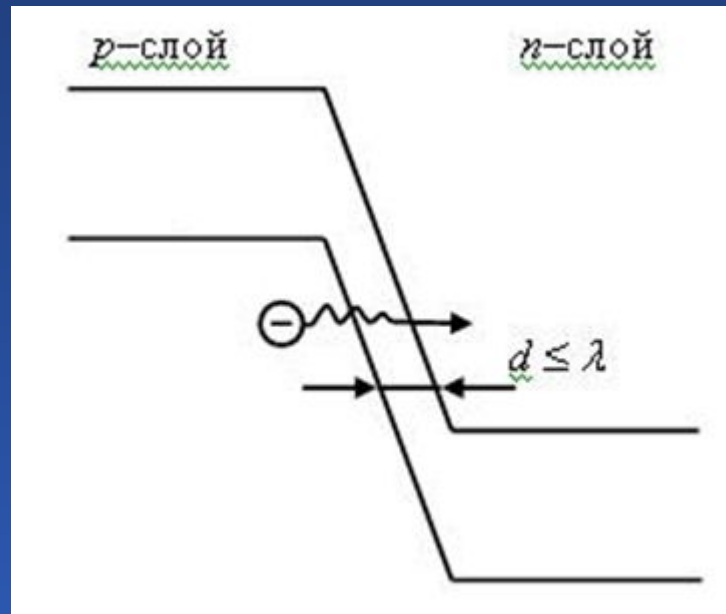
## Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

В качестве основного материала для полупроводниковых стабилитронов используется кремний, обеспечивающий малую величину обратного тока (тока насыщения). В отличие от выпрямительных диодов, в стабилитроне  $p$ - и  $n$ -области сильно легированы. Это приводит к тому, что  $p$ - $n$ -переход имеет малую ширину, а напряженность электрического поля в нем высокая и при приложении даже небольшого обратного напряжения возникает электрический пробой.

Механизм пробоя в полупроводниковых стабилитронах может быть туннельным, лавинным или смешанным.



# **$p$ – $n$ -переход при прямом и обратном напряжении. Механизмы пробоя $p$ – $n$ -перехода (туннельный, лавинный, тепловой)**



Зонная диаграмма туннельного пробоя



## Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

К параметрам стабилитрона, определяемым по его ВАХ, относятся:

$U_{\text{ст ном}}$  – номинальное напряжение стабилизации, измеренное при некотором среднем (номинальном) токе стабилитрона  $I_{\text{ст ном}}$ ;

$U_{\text{ст min}}$  – минимальное напряжение стабилизации, измеренное в начале прямолинейного участка обратной ветви ВАХ;

$I_{\text{ст min}}$  – минимальный ток, при котором измеряется  $U_{\text{ст min}}$ ;

$U_{\text{ст max}}$  – максимальное напряжение стабилизации при токе  $I_{\text{ст max}}$ ;

$I_{\text{ст max}}$  – максимально допустимый обратный ток стабилитрона, ограниченный предельно допустимой мощностью рассеяния на стабилитроне  $P_{\text{ст max}}$ .



## Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

Один из важнейших параметров стабилитрона – **дифференциальное сопротивление** – характеризует наклон его ВАХ в области пробоя:

$$r_d = \frac{dU_{ст}}{dI_{ст}} = \text{const}$$

Влияние температуры на характеристики стабилитрона оценивается **температурным коэффициентом напряжения** стабилизации (ТКН):

$$\text{ТКН} = \Delta U_{ст} / (U_{ст} \cdot \Delta T).$$



## Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

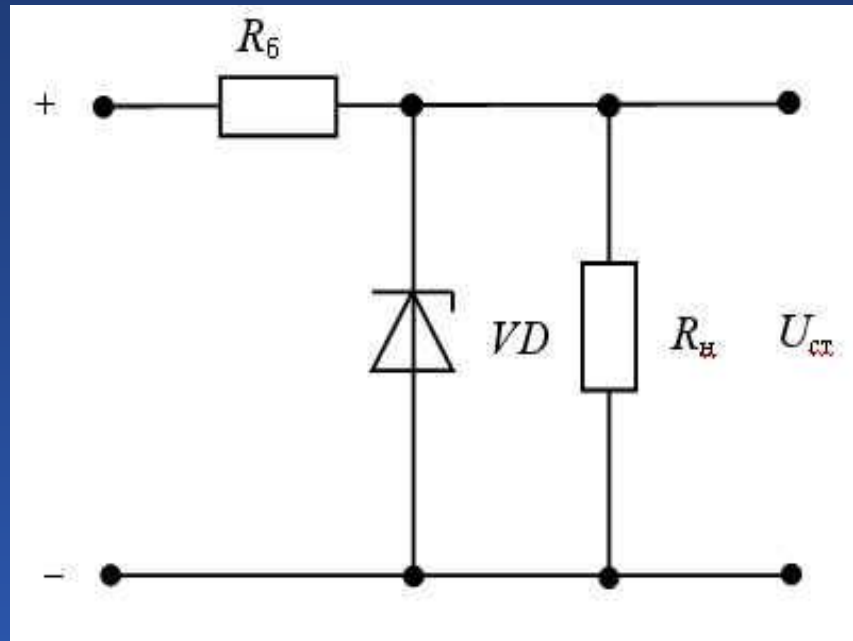
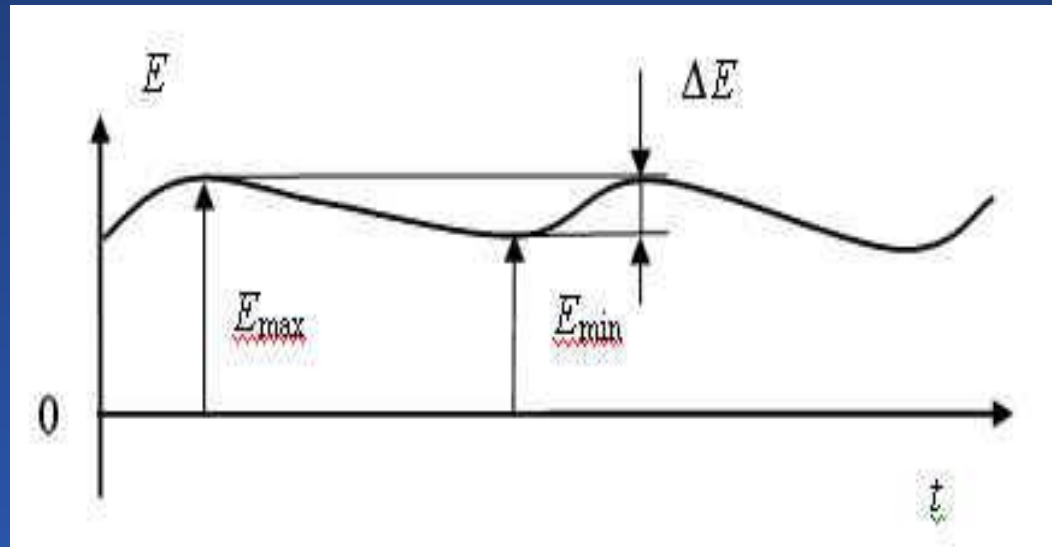


Схема включения стабилитрона:

$R_{\text{б}}$  – балластное (ограничительное) сопротивление,  
 $E_{\text{вх}}$  – входное (нестабилизированное) напряжение,  
 $U_{\text{ст}}$  – выходное стабилизированное напряжение



## Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение



Эюра изменения  
входного напряжения (ЭДС) источника



## Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

Балластное (ограничительное) сопротивление:

$$R_{\text{б}} = (U_{\text{ср}} - I_{\text{ст}}) / (I_{\text{ср}} + I_{\text{н}}),$$

где  $E_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (E_{\text{min}} + E_{\text{max}})$  – среднее значение напряжения источника;  
 $I_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (I_{\text{min}} + I_{\text{max}})$  – средний ток стабилитрона;  $I_{\text{н}} = U_{\text{ст}} / R_{\text{н}}$  – ток через нагрузку.

Стабилизация возможна только при соблюдении условия

$$\Delta E \leq (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \cdot R_{\text{б}}.$$

Эффективность стабилизации напряжения характеризуется коэффициентом стабилизации:

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





## Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

Второй возможный режим стабилизации, когда входное напряжение источника стабильно, а сопротивление нагрузки меняется от  $R_{н\ min}$  до  $R_{н\ max}$ . Для такого режима сопротивление балластного резистора  $R_б$  можно определить по формуле

$$R_б = U_{ст} / (I_{н\ ср} + I_{н\ ср}).$$

$$I_{н\ ср} = 0,5 \cdot (I_{н\ min} + I_{н\ max}),$$

$$I_{н\ min} = U_{ст} / R_{н\ max},$$

$$I_{н\ max} = U_{ст} / R_{н\ min}.$$



## Варикап. Принцип действия, применение

Варикапы – это плоскостные диоды, иначе называемые параметрическими, работающие при обратном напряжении, от которого зависит барьерная емкость. Таким образом, варикапы представляют собой конденсаторы переменной емкости, управляемые не механически, а электрически, т. е. изменением обратного напряжения.

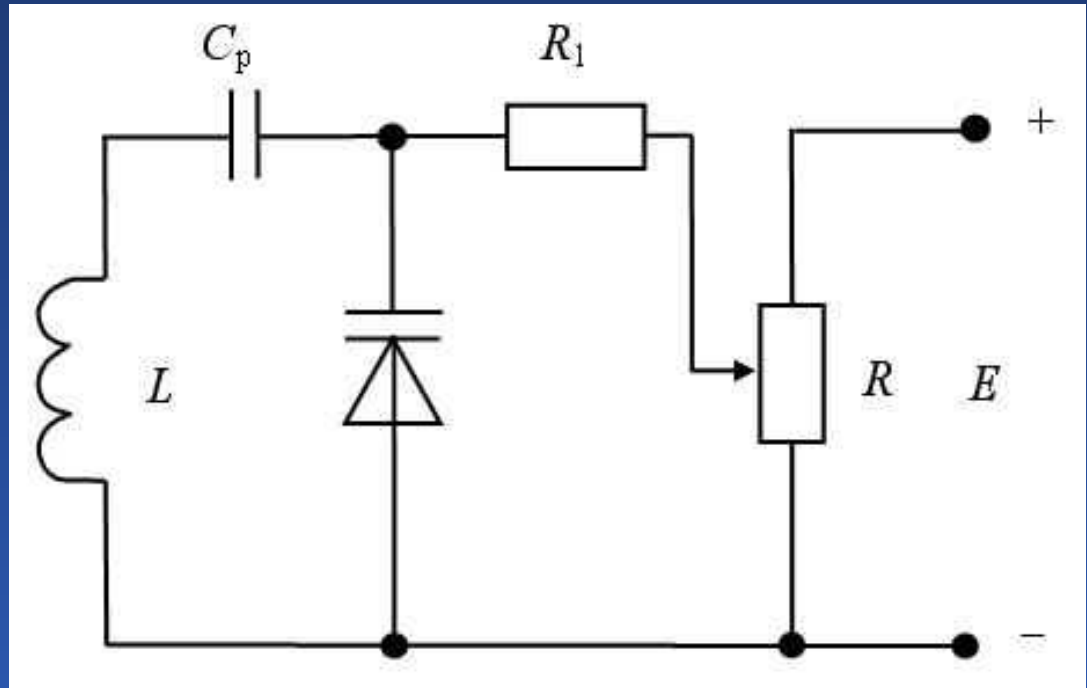


Схема включения варикапа  
в колебательный контур  
в качестве конденсатора переменной емкости



## Тема 3

# Биполярные транзисторы

Лекция 6 

Лекция 7 

Лекция 8 

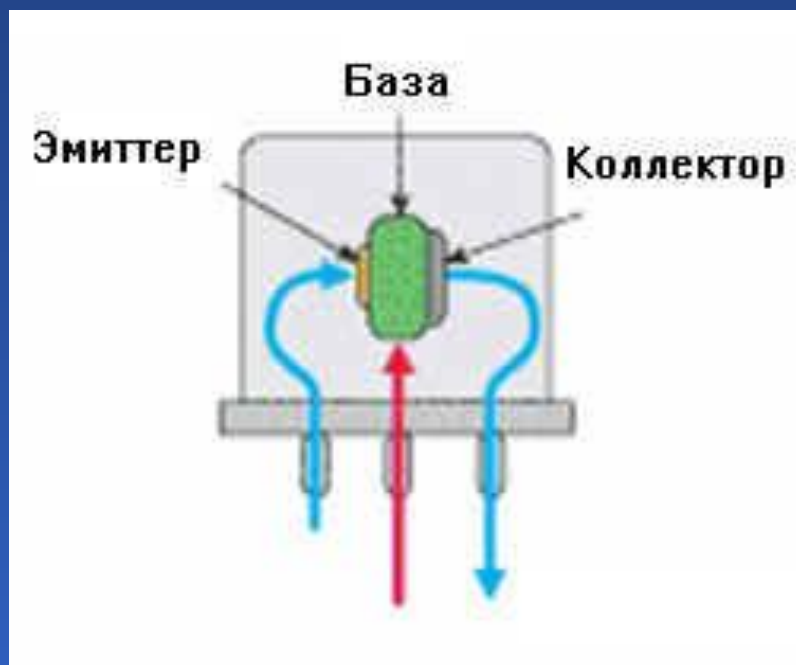
Лекция 9 

Лекция 10 

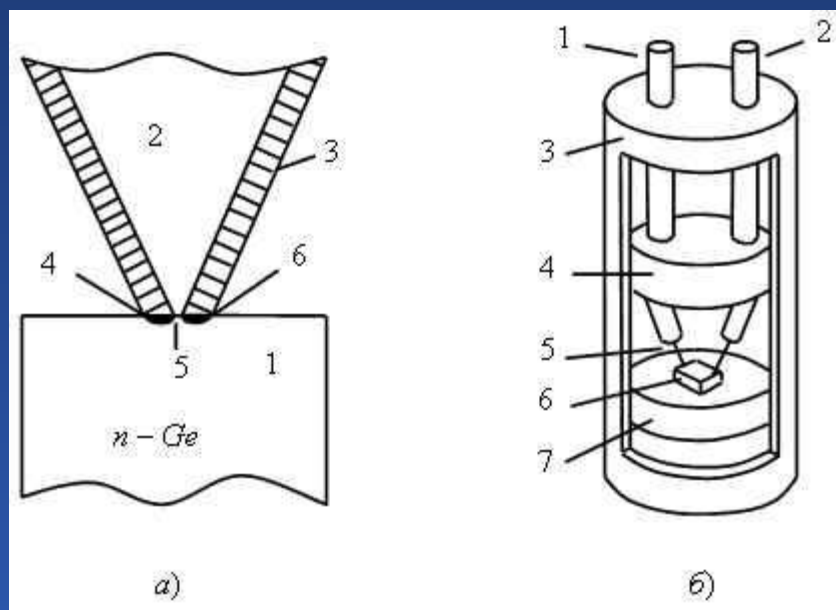
Выбор темы

# Биполярные транзисторы

Полупроводниковый прибор, имеющий три электрода и два взаимодействующих между собой  $p$ – $n$ -перехода, называется биполярным транзистором.



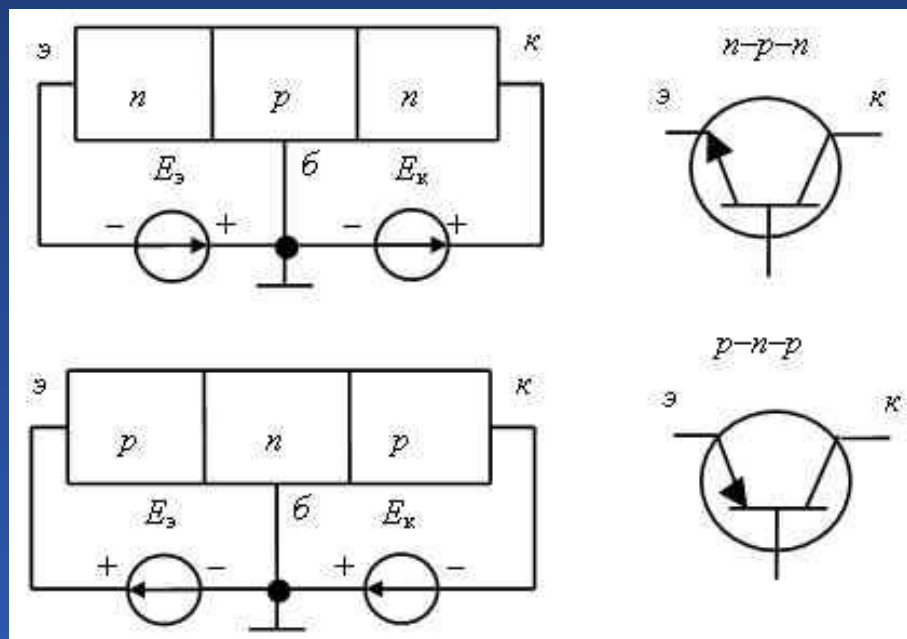
# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Конструкция первого биполярного транзистора (а) и первый промышленный образец (б)



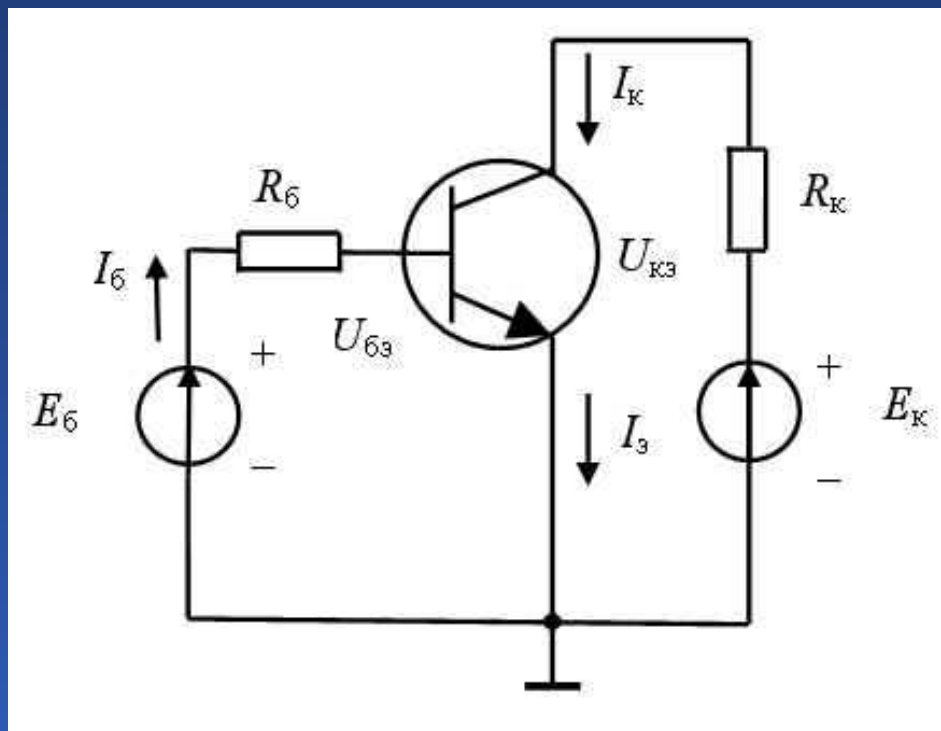
# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Устройство, условное обозначение  
и включение биполярных  
транзисторов в активном режиме



# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Включение биполярного транзистора  $n-p-n$ -типа по схеме с общим эмиттером



# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

## Режимы работы биполярного транзистора

В зависимости от того, какие напряжения действуют на переходах, различают 3 режима работы транзистора:

- *активный режим* работы или режим усиления, когда эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный в обратном;
- *режим насыщения*, когда оба перехода смещены в прямом направлении;
- *режим отсечки*, когда оба перехода смещены в обратном направлении.





# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

*Принцип работы биполярного транзистора* заключается в том, что незначительный по величине ток базы  $I_{\bar{б}}$ , возникающий при подаче прямого напряжения  $U_{\bar{бэ}}$  на переход эмиттер-база, вызывает значительные изменения тока эмиттера  $I_{\bar{э}}$  и тока коллектора  $I_{\bar{к}}$

$$I_{\bar{к}} = \beta_{\text{ст}} \cdot I_{\bar{б}}$$

$$I_{\bar{к}} = I_{\bar{к}0} \left( \exp(U_{\bar{бэ}} / \varphi_T) - 1 \right)$$

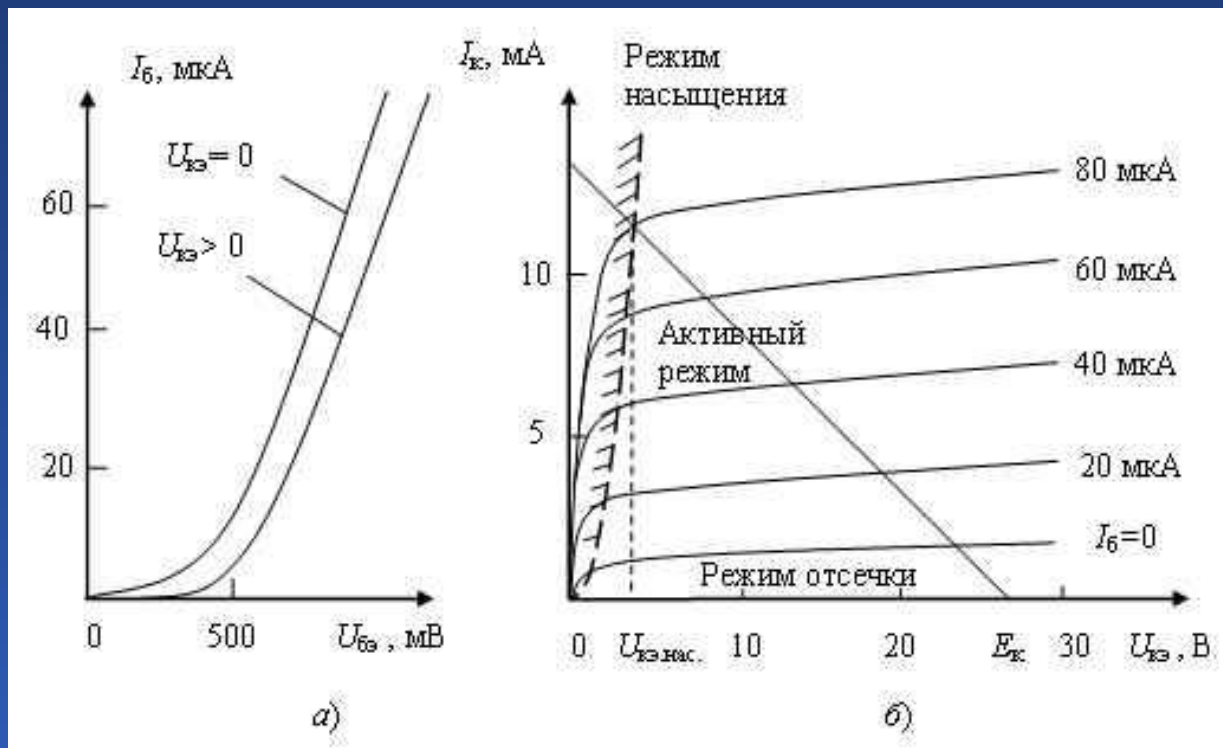
$$I_{\bar{э}} = I_{\bar{к}} + I_{\bar{б}}$$

$\beta_{\text{ст}}$  – статический коэффициент передачи тока базы

$I_{\bar{к}0}$  – обратный ток коллекторного перехода,  
 $\varphi_T$  – температурный потенциал



# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Входные (а) и выходные (б) ВАХ  
биполярного транзистора  $n$ - $p$ - $n$ -типа в схеме с общим эмиттером



# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

$$h_{11} = (\Delta U_{\text{бэ}} / \Delta I_{\text{б}}) | U_{\text{кэ}} = \text{const}$$

$$k_U = (\Delta U_{\text{кэ}} / \Delta U_{\text{бэ}})$$

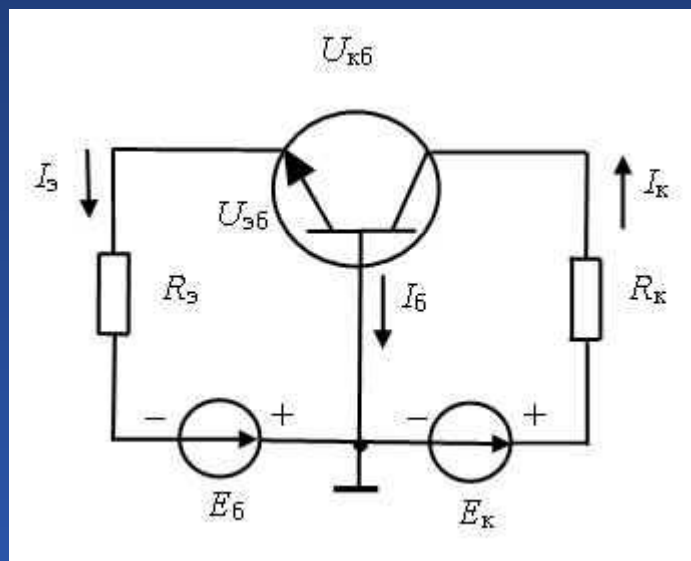
$$h_{12} = (\Delta U_{\text{бэ}} / \Delta U_{\text{кэ}}) | I_{\text{б}} = \text{const}$$

$$h_{21} = (\Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}}) | U_{\text{кэ}} = \text{const}$$

$$h_{22} = (\Delta I_{\text{к}} / \Delta U_{\text{кэ}}) | I_{\text{б}} = \text{const}$$



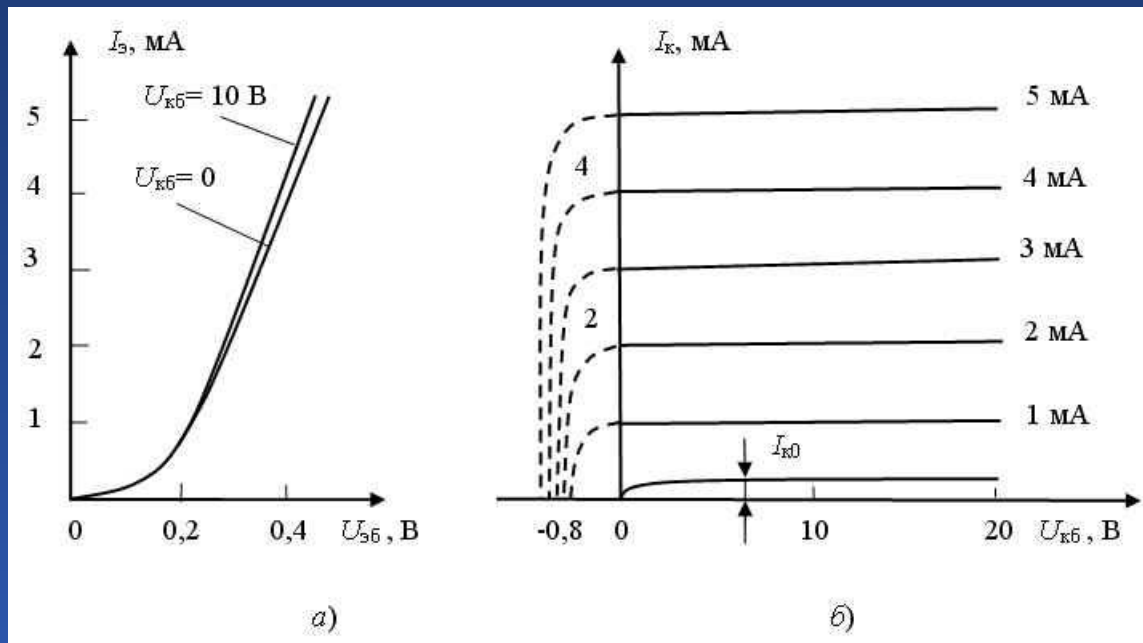
# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Включение  
биполярного транзистора  
 $n-p-n$ -типа по схеме с общей базой



# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Входные (а) и выходные (б) ВАХ  
биполярного транзистора *n-p-n*-типа в схеме с общей базой



# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

$$h_{11}(\text{об}) = (\Delta U_{эб} / \Delta I_э) | U_{кб} = \text{const}$$

$$h_{21}(\text{об}) = (\Delta I_к / \Delta I_э) | U_{кб} = \text{const}$$

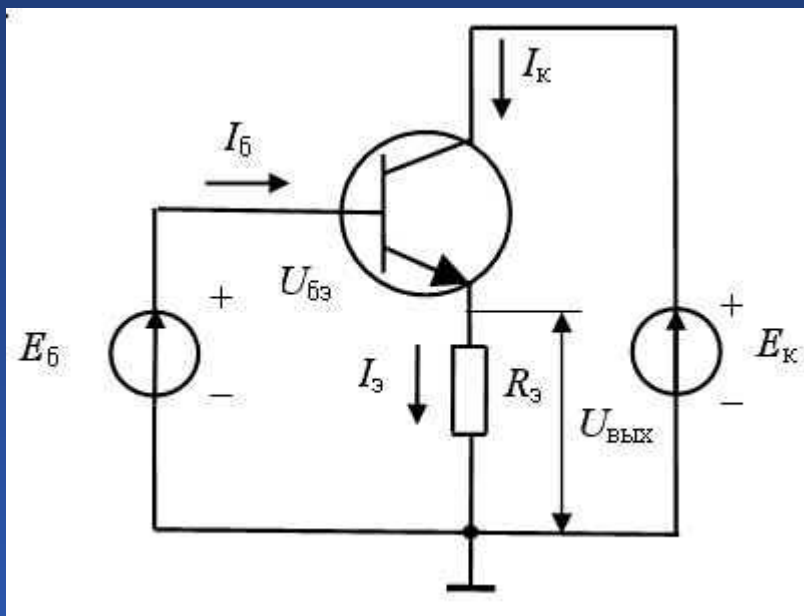
$$h_{12}(\text{об}) = (\Delta U_{эб} / \Delta U_{кб}) | I_э = \text{const}$$

$$h_{22}(\text{об}) = (\Delta I_к / \Delta U_{кб}) | I_э = \text{const}$$

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ
$h_{11}$	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки ом
$h_{12}$	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
$h_{21}$	Десятки – сотни	0,95 – 0,98
$1/h_{22}$	Единицы – десятки килоом	Сотни килом – единицы мегаом



# Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Включение  
биполярного транзистора  
 $n-p-n$ -типа по схеме с общим коллектором

$$R_{вх} = U_{вх} / I_б = (U_{бэ} + U_{вых}) / I_б$$

$$K_i = I_э / I_б$$

$$K_U = U_{вых} / (U_{бэ} + U_{вых}) < 1$$

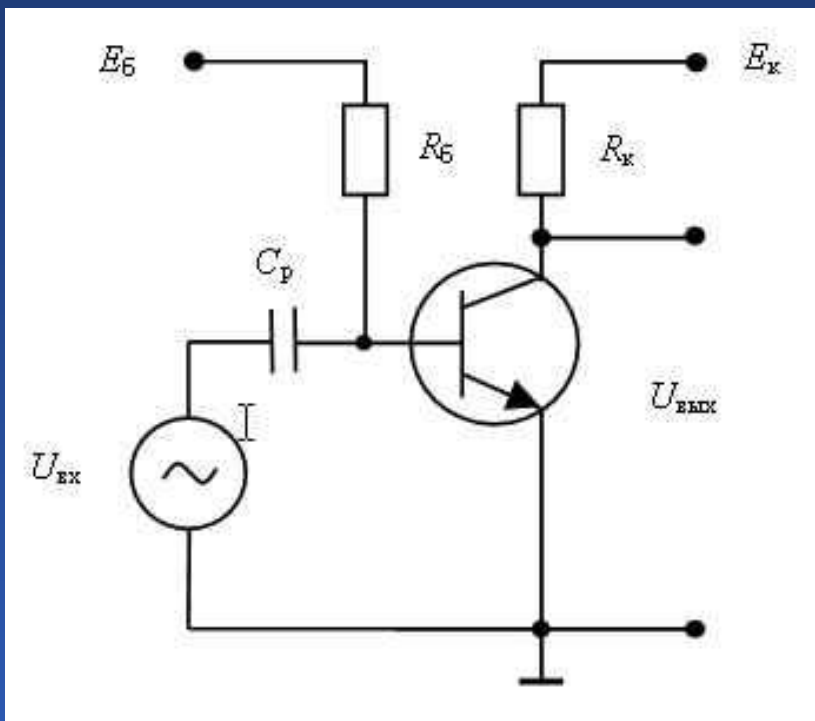
## Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, \*ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
$k_i$	Десятки – сотни	$< 1$	Десятки – сотни
$K_U$	Десятки – сотни	Десятки – сотни	$< 1$
$K_P$	Сотни–десятки тысяч	Десятки – сотни	Десятки – сотни
$R_{вх}$	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки ом	Десятки – сотни килоом
$R_{вых}$	единицы – десятки килоом	Сотни килоом – Единицы мегаом	Сотни ом – единицы килоом
Фазовый сдвиг ме- жду $U_{вх}$ и $U_{вых}$	$180^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$





## Режимы работы биполярных транзисторов



Типовая схема  
усилительного каскада  
с общим эмиттером

$$I_{\text{к}} = (E_{\text{к}} - U_{\text{кэ}}) / R_{\text{к}}$$

$$P_{\text{вых}} = 0,5 \cdot I_{\text{км}} \cdot U_{\text{кэ м}}$$

$$P_{\text{вх}} = 0,5 \cdot I_{\text{б м}} \cdot U_{\text{бэ м}}$$

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{бэ м}} / I_{\text{б м}}$$

$$R_{\text{б}} = (E_{\text{б}} - U_{\text{бэ(0)}}) / I_{\text{б(0)}}$$

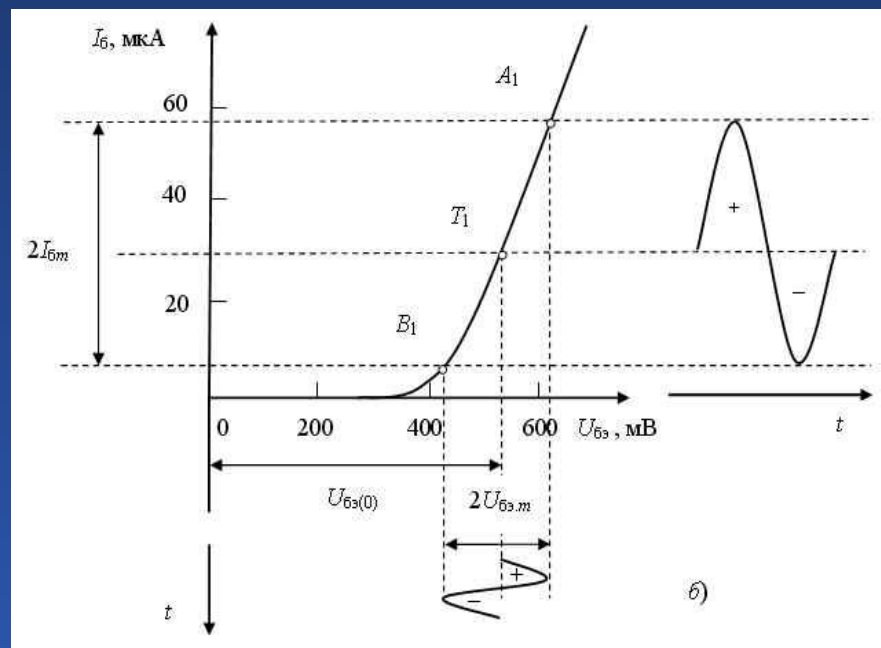
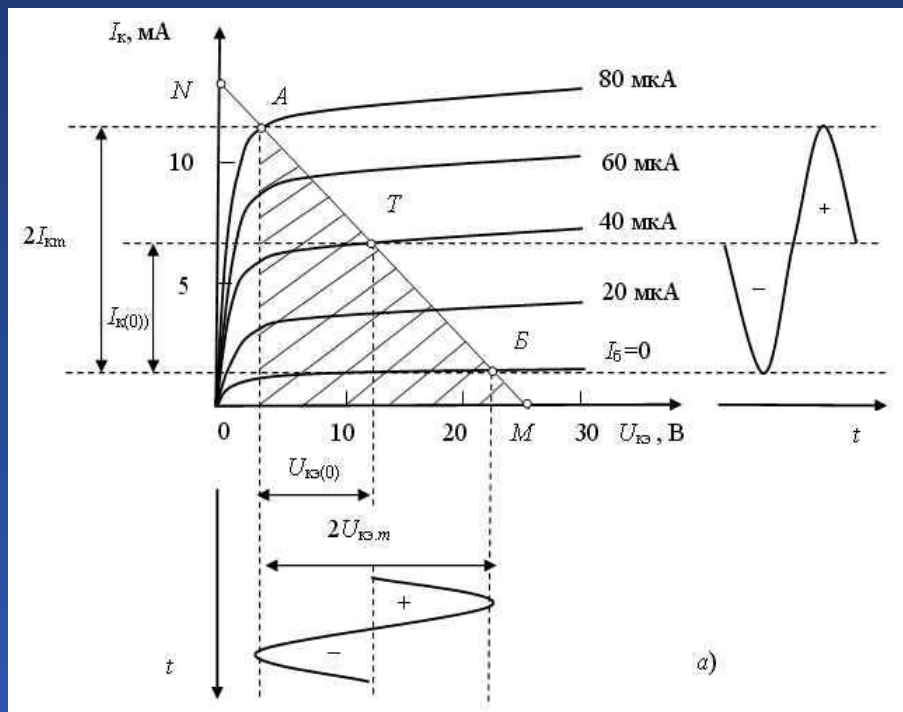
$$K_I = I_{\text{км}} / I_{\text{б м}}$$

$$K_U = U_{\text{кэ м}} / U_{\text{бэ м}}$$

$$K_p = K_I \cdot K_U$$



# Режимы работы биполярных транзисторов

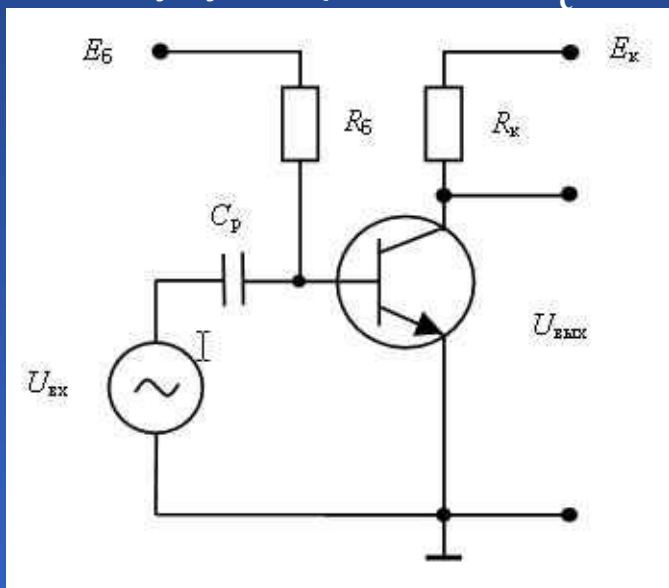


К графоаналитическому методу расчета  
и анализу усилительного каскада на биполярном транзисторе



## Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

**Класс усиления А.** Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает в течение всего периода изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления класса А. Характерной чертой этого режима является выполнение условия  $\Delta I_{\text{к}} < I_{\text{кп}}$ , для обеспечения которого напряжение  $U_{\text{см}}$  применительно к схеме на рисунке должно быть положительным и превосходить максимальную амплитуду напряжения  $U_{\text{с}}$ .



Ток покоя коллектора:

$$I_{\text{кп}} = (I_{\text{к min}} + I_{\text{к max}})/2.$$

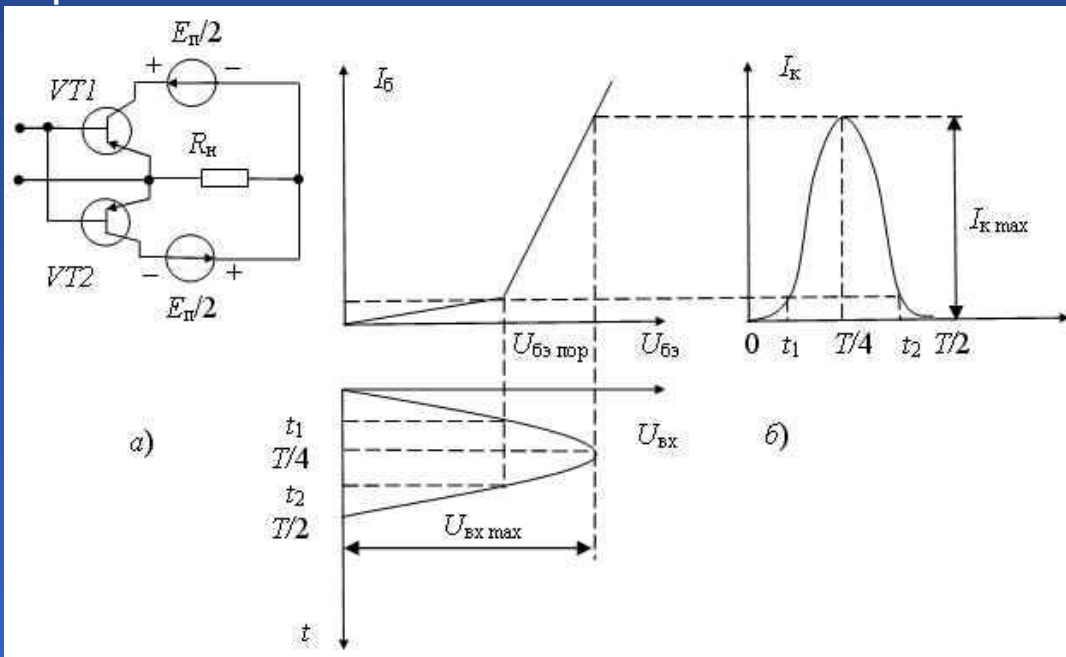
Максимальная амплитуда выходного тока:

$$\Delta I_{\text{к max}} = (I_{\text{к max}} - I_{\text{к min}})/2.$$



# Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

**Класс усиления В.** Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает только в течение половины периода изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления класса В. Данный режим соответствует выбору  $U_{см} = 0$ . При этом  $I_{кп} = I_{к\ min} \approx 0$  и  $U_{кэ\ п} = U_{п} - I_{к\ min} R_{к} \approx U_{п}$ . Мощность, рассеиваемая в каскаде при условии  $U_c = 0$ , практически также равна нулю, так как транзистор находится в режиме отсечки.



Принципиальная схема двухтактного усилителя мощности (а) и временные диаграммы (б), поясняющие ее работу (VT1 – n–p–n, VT2 – p–n–p)



## Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

Класс усиления АВ. Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает больше половины периода изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления класса АВ.

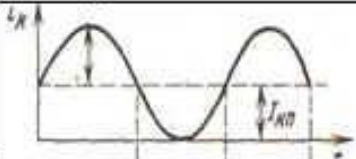
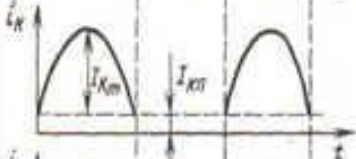
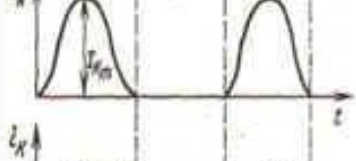


Класс усиления С. Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает на интервале меньшем половины периода изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления класса С .

Класс усиления D. Режим работы транзисторного каскада, при котором в установившемся режиме усилительный элемент (биполярный транзистор) может находиться только в состоянии «Включено» (режим насыщения биполярного транзистора) или «Выключено» (режим отсечки биполярного транзистора), называется ключевым режимом или режимом усиления класса D.

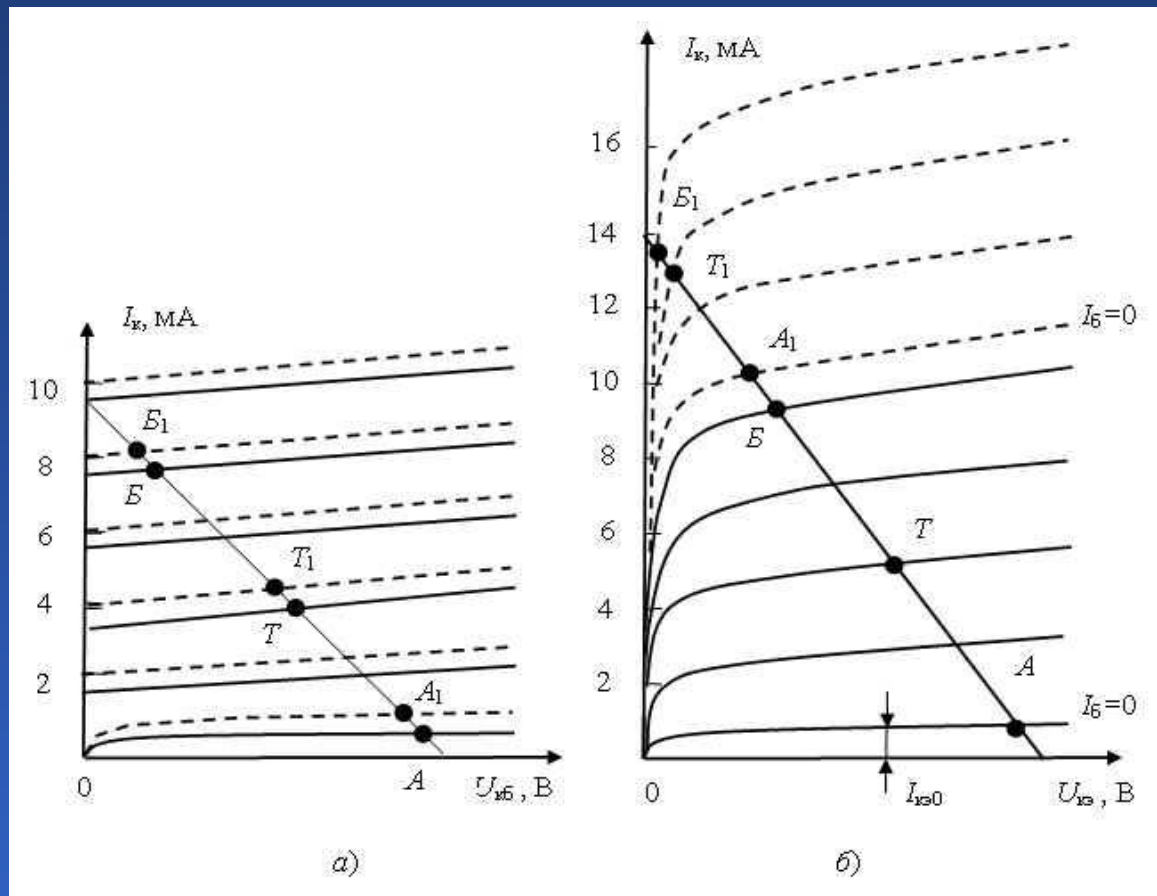


# Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

## Основные параметры усилителей различных классов усиления

Класс усиления	Напряжение смещения	Ток покоя транзистора	Зависимость тока от времени	Примечание
A	$> 0$	$I_{бп} h_{21Э}$		$I_{к м} < I_{кп}$
AB	$> 0$	$I_{бп} h_{21Э}$		$I_{к м} < I_{кп}$ $I_{к м} < U_k/R_{кп}$
B	$= 0$	$I_{к нач}$		$I_{к м} \leq U_k/R_{кп}$
C	$< 0$	$I_{к0}$		$I_{к м} \leq U_k/R_{кп}$
D	$< 0$	$I_{к0}$		$I_{к м} = U_k/R_{кп}$

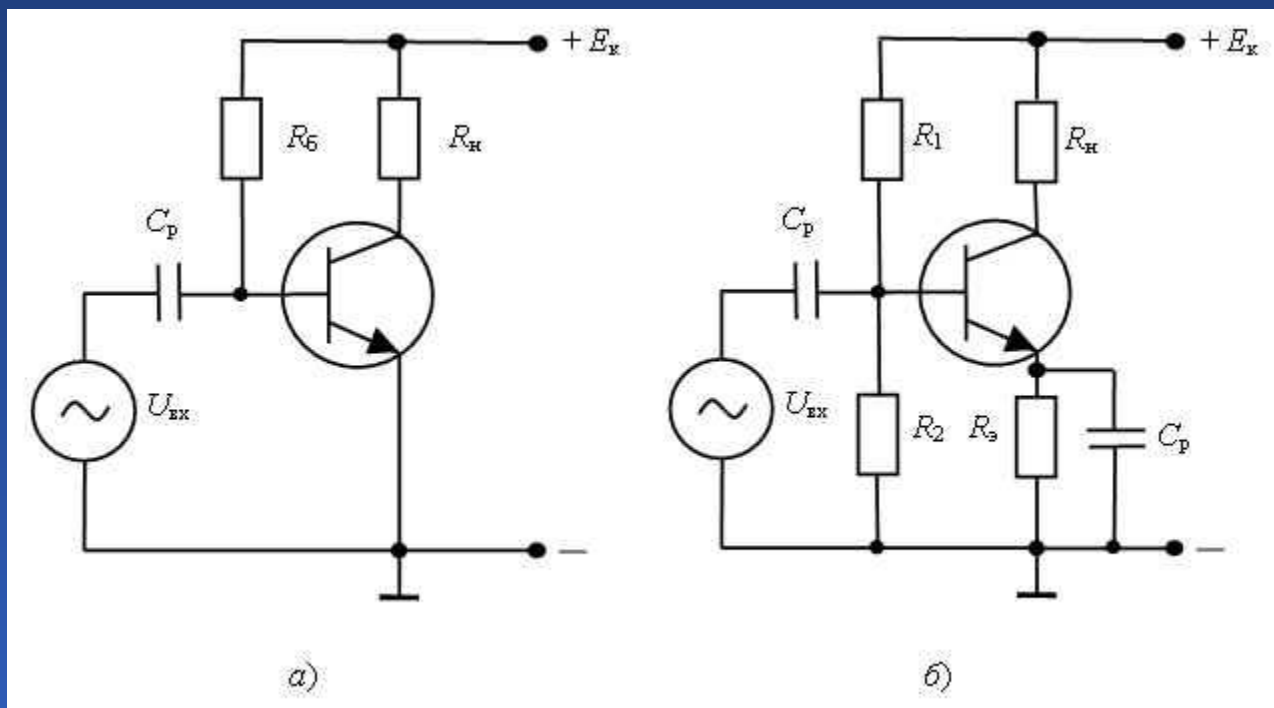
# Влияние внешних условий на характеристики и параметры БТ. Проблема стабилизации рабочей точки и усиления



Влияние температуры на выходные характеристики транзистора при включении его по схеме ОБ (а) и ОЭ (б)



# Влияние внешних условий на характеристики и параметры БТ. Проблема стабилизации рабочей точки и усиления



$$R_1 \approx (E_k - U_э) / (I_{60} + I_D)$$

$$R_2 \approx U_э / I_D$$

$$R_3 \approx U_э / I_{э0}$$

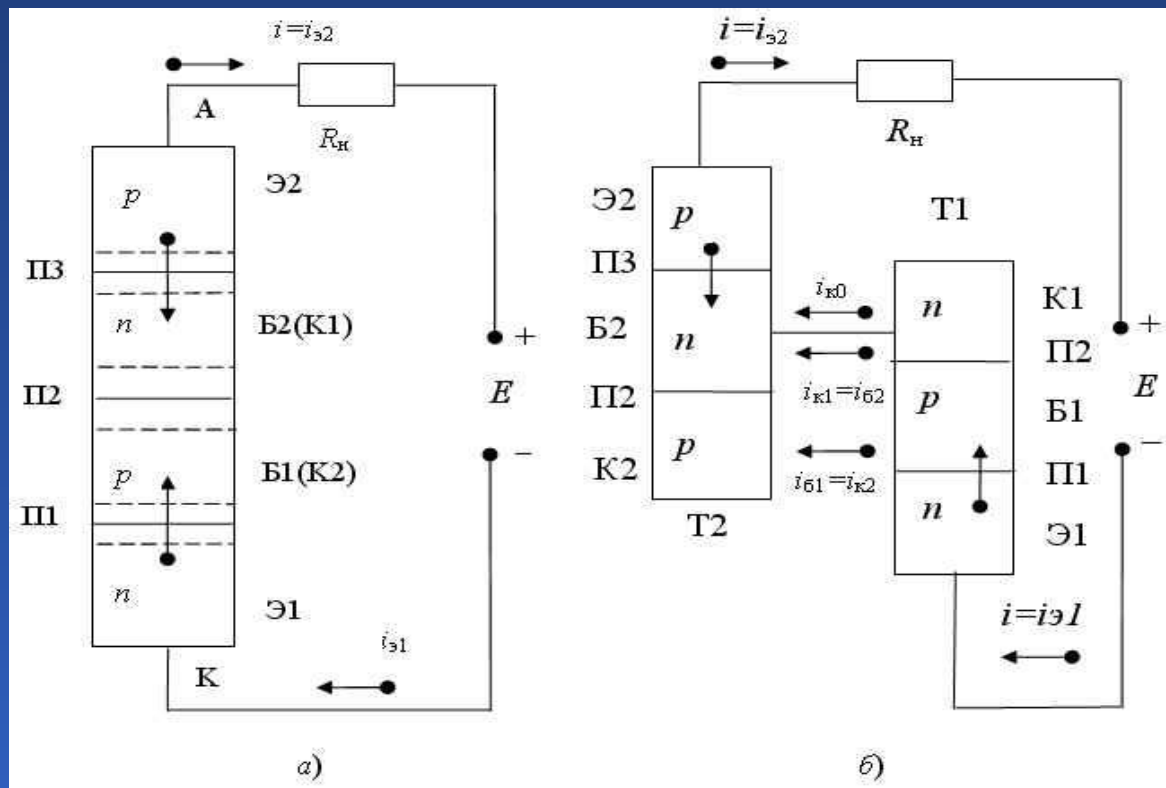
Схемы стабилизации рабочего режима усилительного каскада на биполярном транзисторе





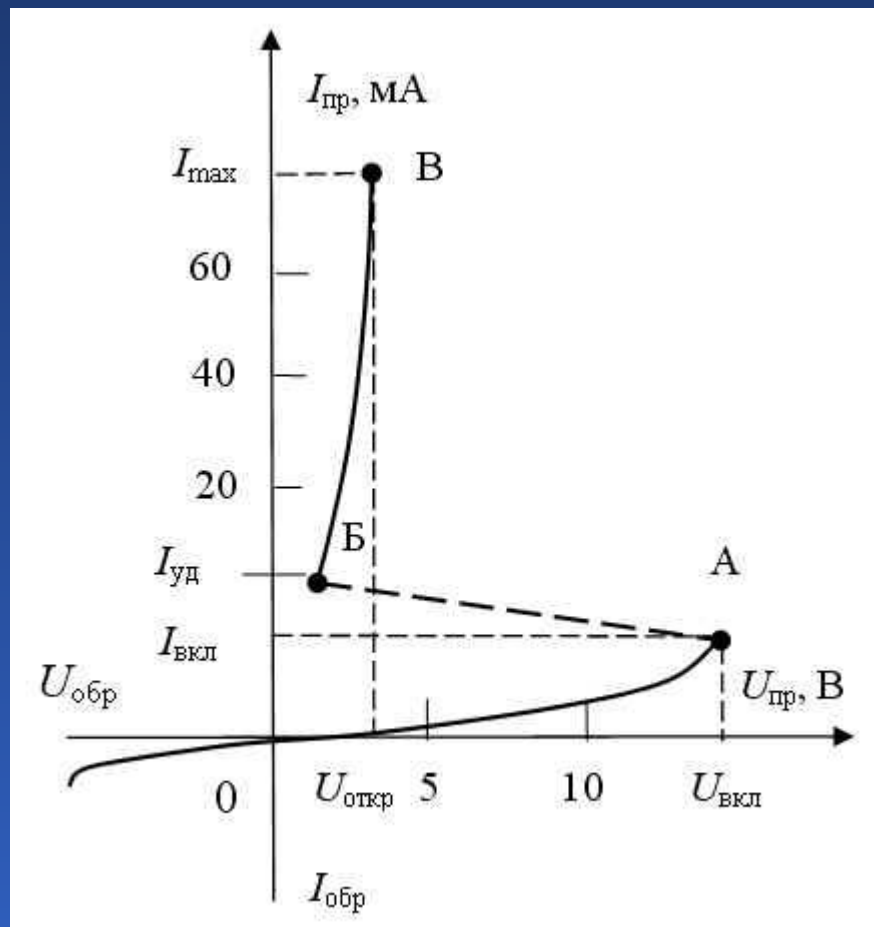
## Тиристоры и симисторы

Тиристоры являются переключающими приборами. Их название происходит от греческого слова *thyra* (тира), означающего «дверь», «ВХОД».



Структура диодного тиристора (а)  
и его эквивалентная схема в виде двух транзисторов (б)

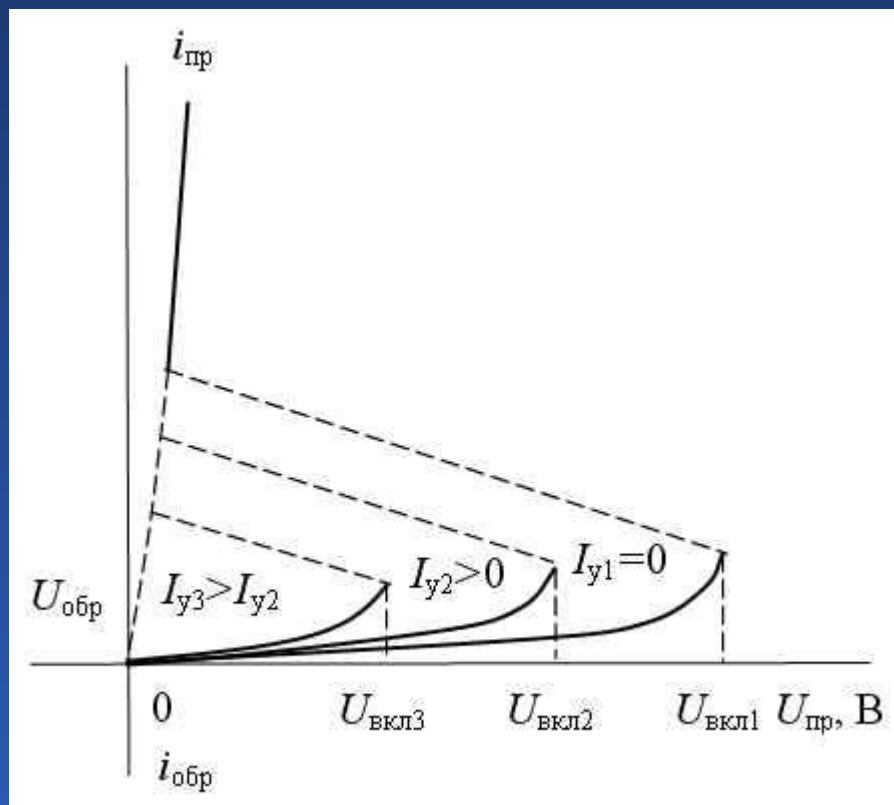
## Тиристоры и симисторы



Вольт-амперная характеристика диодного тиристора



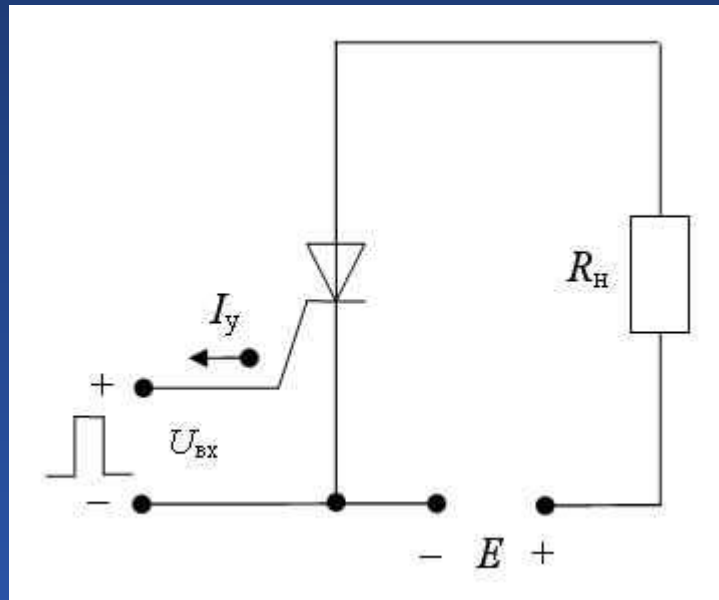
# Тиристоры и симисторы



Вольт-амперные характеристики  
триодного тиристора  
для разных управляющих токов



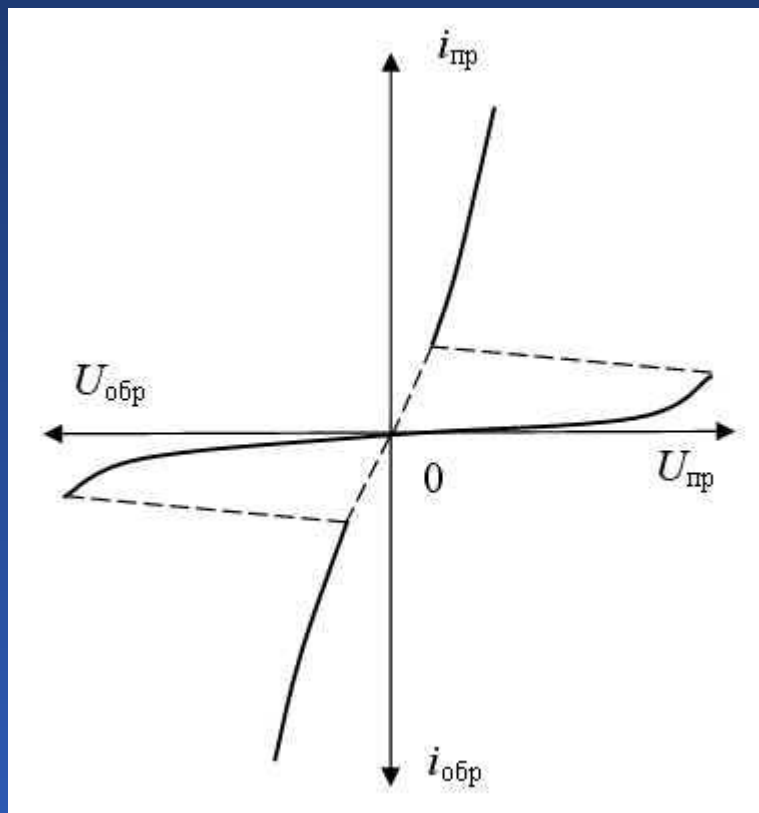
# Тиристоры и симисторы



Простейшая схема включения  
триодного тиристора  
с выводом от  $p$ -области



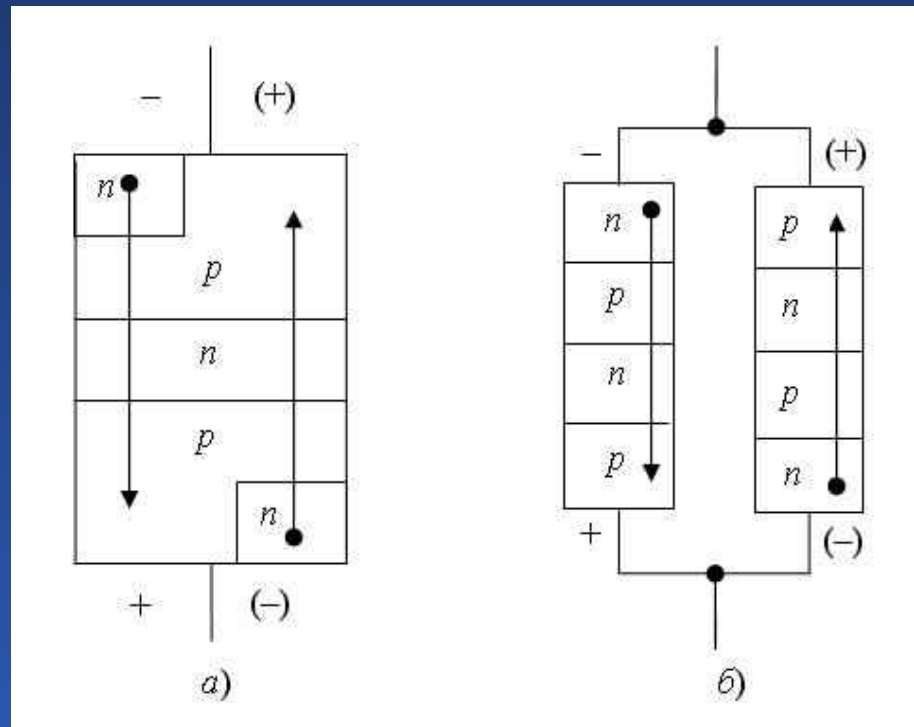
# Тиристоры и симисторы



Вольт-амперная характеристика симметричного тиристора



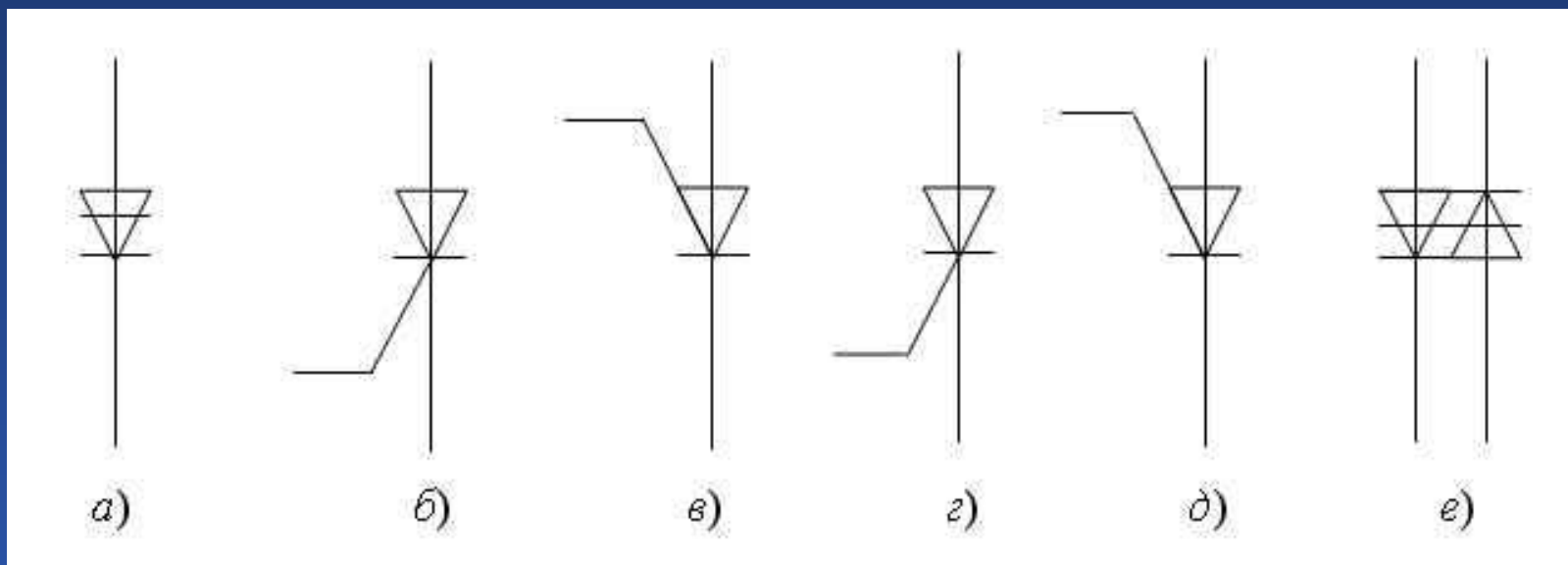
# Тиристоры и симисторы



Структура симметричного тиристора (а)  
и замена симметричного тиристора  
двумя диодными тиристорами (б)



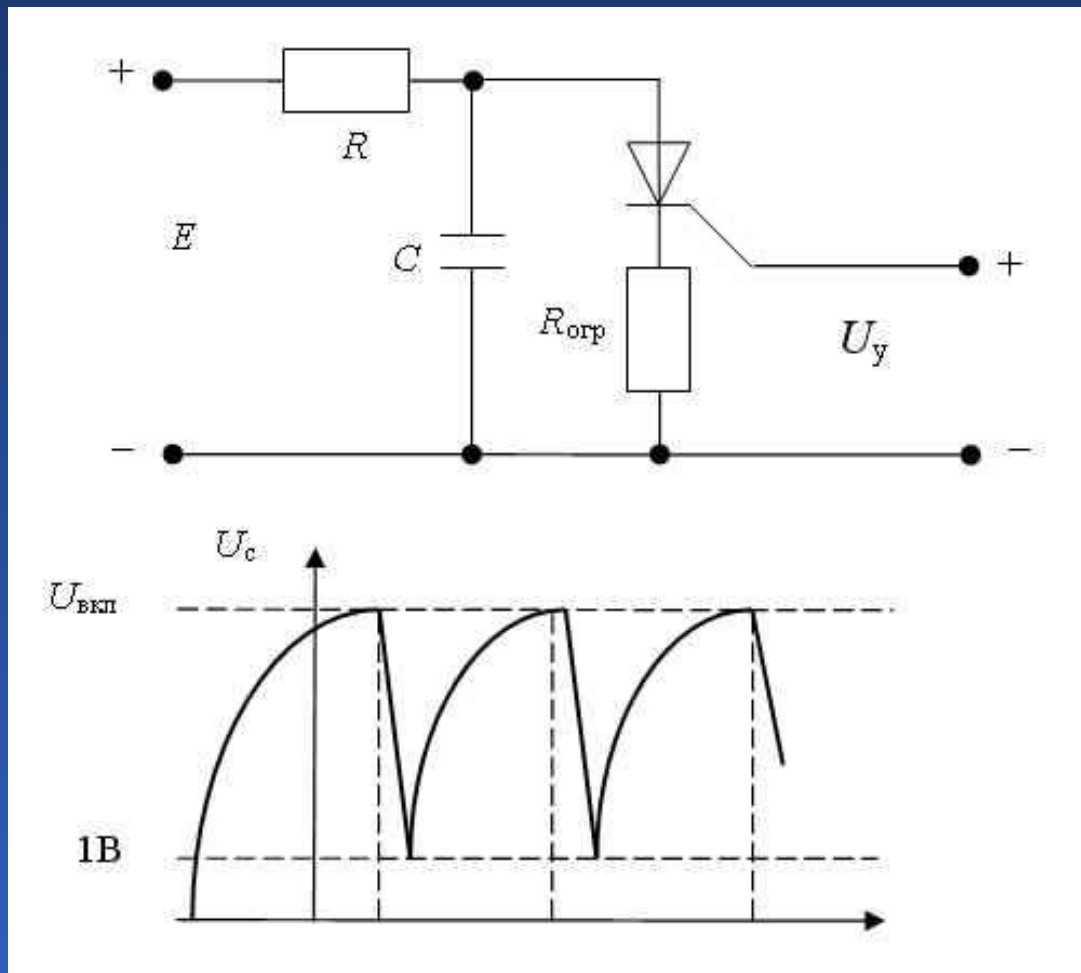
## Тиристоры и симисторы



Условные графические обозначения различных тиристоров:  
*a* – диодный тиристор, *б* и *в* – незапираемые триодные тиристоры с выводом от *p*- и *n*-области, *г* и *д* – запираемые триодные тиристоры с выводом от *p*- и *n*-области, *е* – симметричный тиристор



# Тиристоры и симисторы



Генератор пилообразного напряжения с тиристором





## Тема 5

# Полевые транзисторы

Лекция 12



Лекция 13



Лекция 14



Лекция 15



Выбор темы

## Тема 5

# Полевые транзисторы

- 5.1. Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора
- 5.2. Структура и принцип действия ПТ с управляющим  $p-n$ -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки. Статические ВАХ и параметры в схеме с общим истоком
- 5.3. Структура и принцип действия МОП-транзистора
- 5.4. Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме
- 5.5. Линейные и нелинейные модели ПТ для ВЧ и СВЧ

# Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора

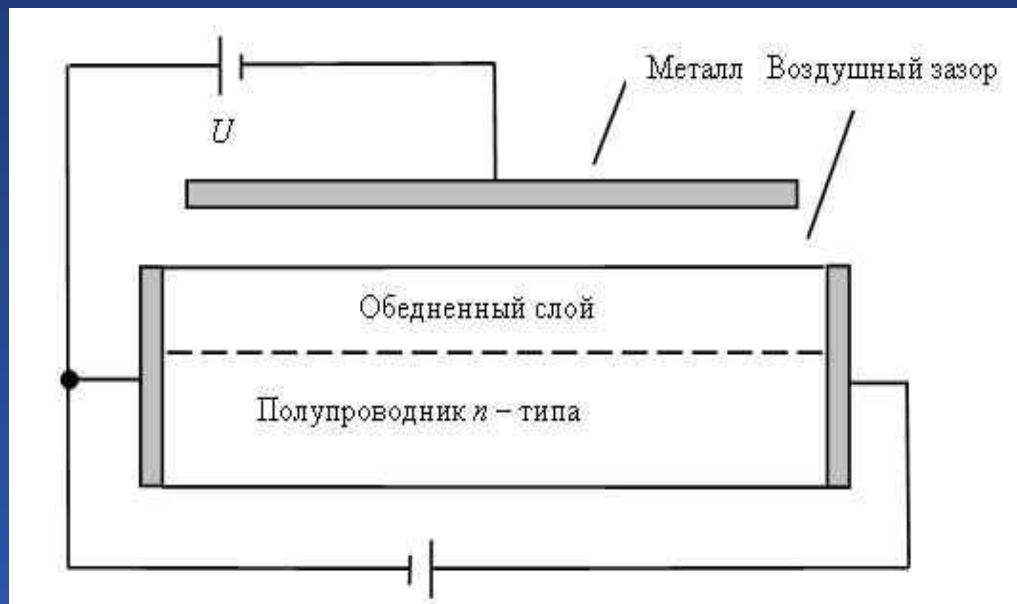
*Полевым транзистором* называется полупроводниковый прибор, управление током которого основано на зависимости электрического сопротивления токопроводящего слоя от напряженности поперечного электрического поля

В настоящее время существуют три основных разновидности полевых транзисторов:

- полевые транзисторы с управляющим  $p-n$ -переходом;
- полевые транзисторы со структурой металл – окисел – полупроводник или МОП-транзисторы;
- полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ).



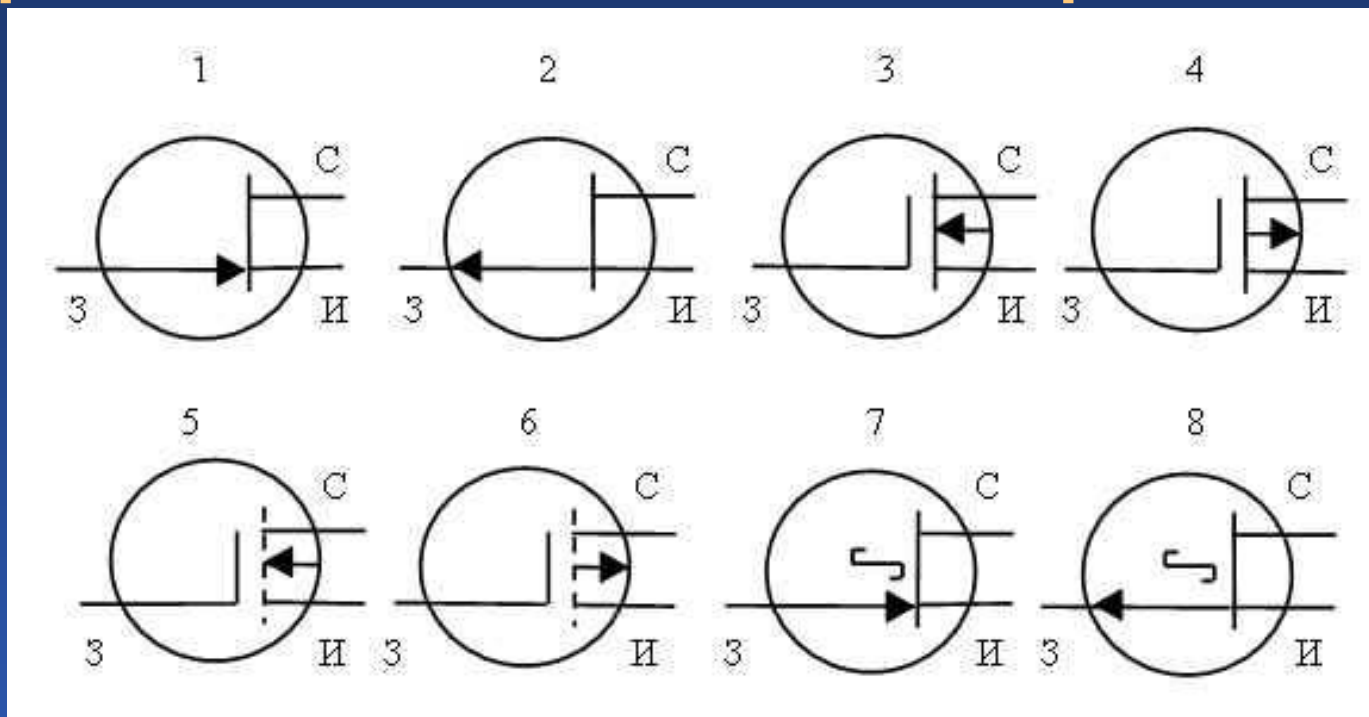
# Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора



Конструкция прибора, запатентованного  
Ю. Лилиенфельдом



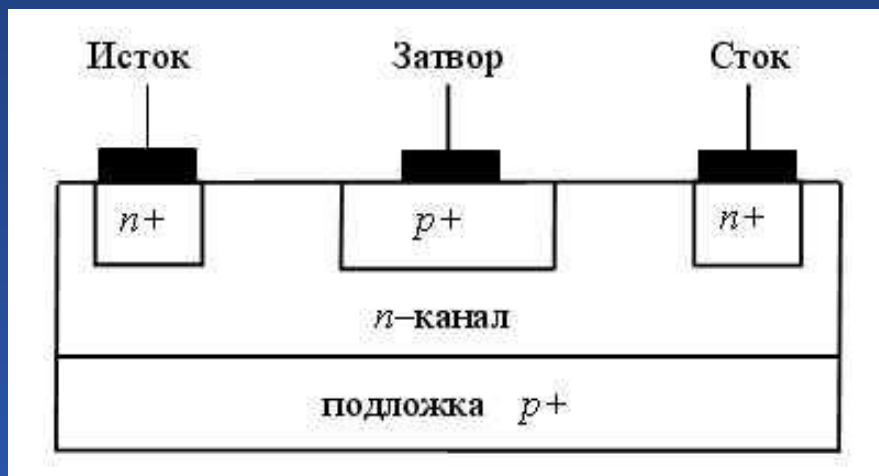
# Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора



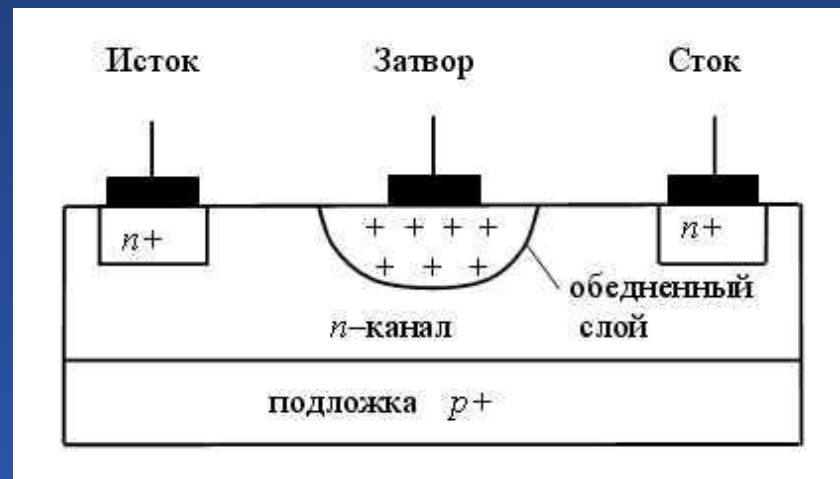
Условные обозначения различных типов полевых транзисторов (И – исток, С – сток, З – затвор): 1, 2 – транзисторы с управляющим  $p-n$ -переходом (1 – с  $n$ -каналом, 2 – с  $p$ -каналом); 3, 4 – МОП-транзисторы со встроенным каналом (3 – с  $n$ -каналом, 4 – с  $p$ -каналом); 5, 6 – МОП-транзисторы с индуцированным каналом (5 – с  $n$ -каналом, 6 – с  $p$ -каналом); 7, 8 – транзисторы с барьером Шоттки (7 – с  $n$ -каналом, 8 – с  $p$ -каналом)



# Структура и принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки



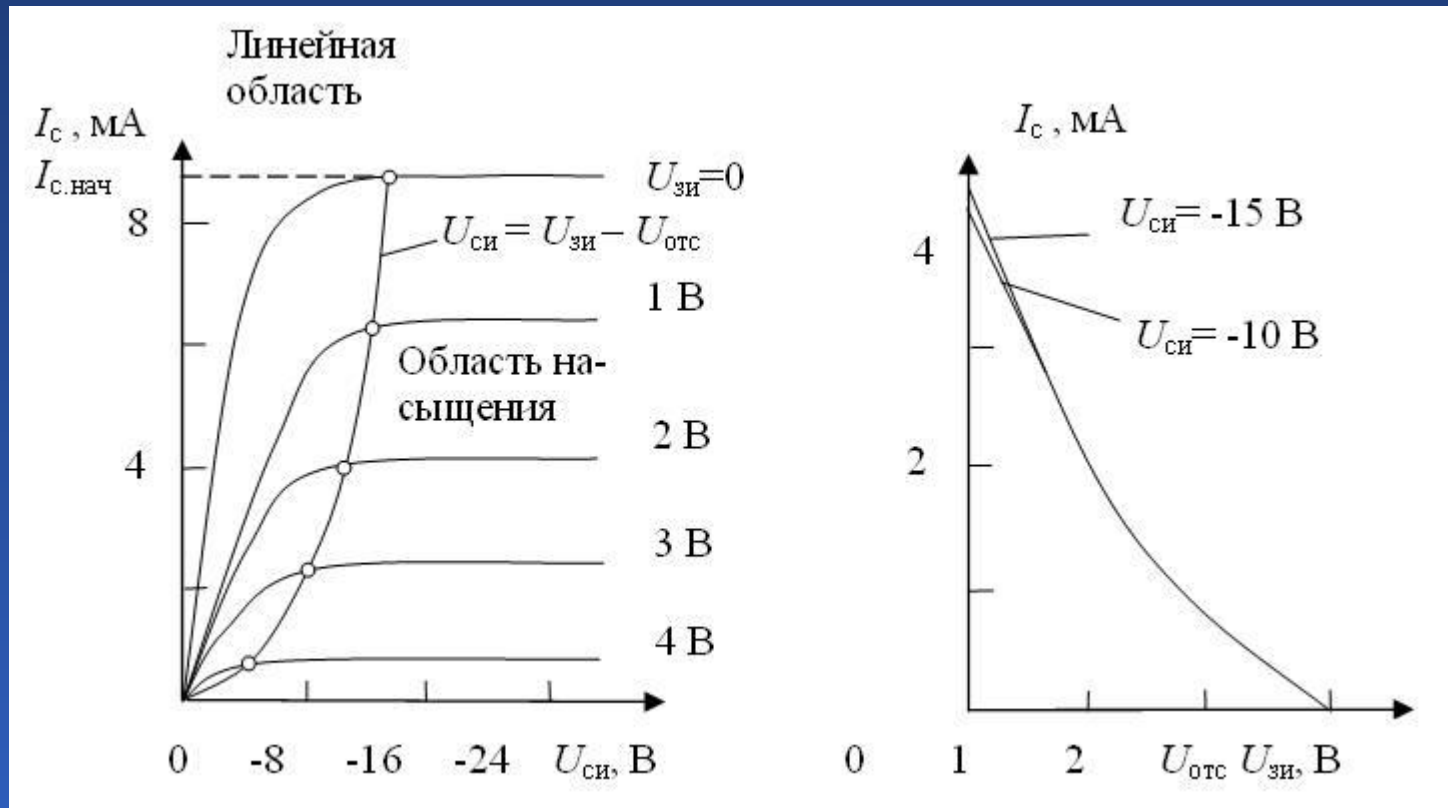
Структура полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом



Структура полевого транзистора с барьером Шоттки



# Структура и принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки



Выходные (а) и передаточные (б) характеристики транзистора КП103М с каналом  $p$ -типа



# Структура и принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки

## Параметры полевого транзистора

Теоретическое описание ВАХ полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом в области насыщения получено Уильямом Шокли:

$$I_c = I_{c \max} \left[ 1 - 3 \frac{U_{зи}}{U_{отс}} + 2 \left( \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right)^{3/2} \right],$$

где  $I_{c \max}$  – максимальный ток стока при  $U_{зи} = 0$ ,  
называемый также начальным током  $I_{c.нач}$





# Структура и принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки

## Параметры полевого транзистора

На практике используют более простое описание ВАХ в области насыщения:

$$I_c = k(U_{отс} - U_{зи})^2,$$

где  $k = I_{с.нач} / U_{отс}^2$  – постоянный коэффициент, зависящий от геометрических и электрофизических параметров транзистора.

В линейной области ВАХ ПТ описывается выражением

$$I_{отс} = 2k \left[ (U_{зи} - U_{си}) \cdot U - \frac{U_{си}^2}{2} \right].$$



# Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора

## Параметры полевого транзистора

Основной параметр ПТ – крутизна – характеризует усилительные свойства полевого транзистора в области насыщения и измеряется в сименсах (Сим) или – как чаще принято называть – в миллиамперах на вольт:

$$S = (\partial I_c / \partial U_{зи})|_{U_{си}} = \text{const.}$$

Выходное (внутреннее) сопротивление  $R_i$ , называемое также дифференциальным сопротивлением, представляет сопротивление канала ПТ переменному току:

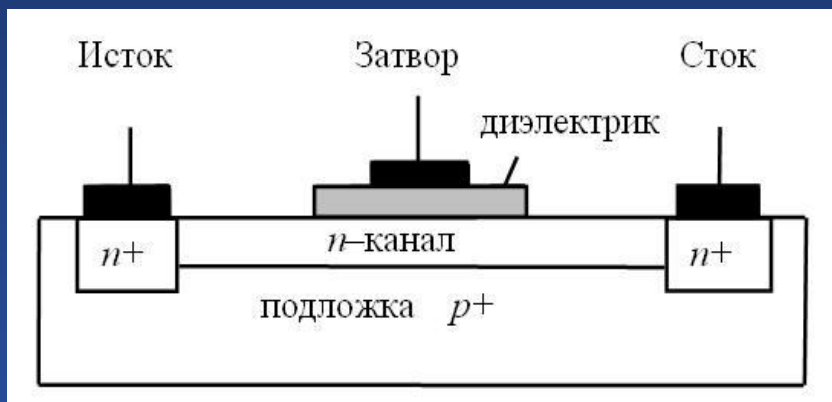
$$R_i = (\partial U_{си} / \partial I_c)|_{U_{зи}} = \text{const.}$$

Входное сопротивление:

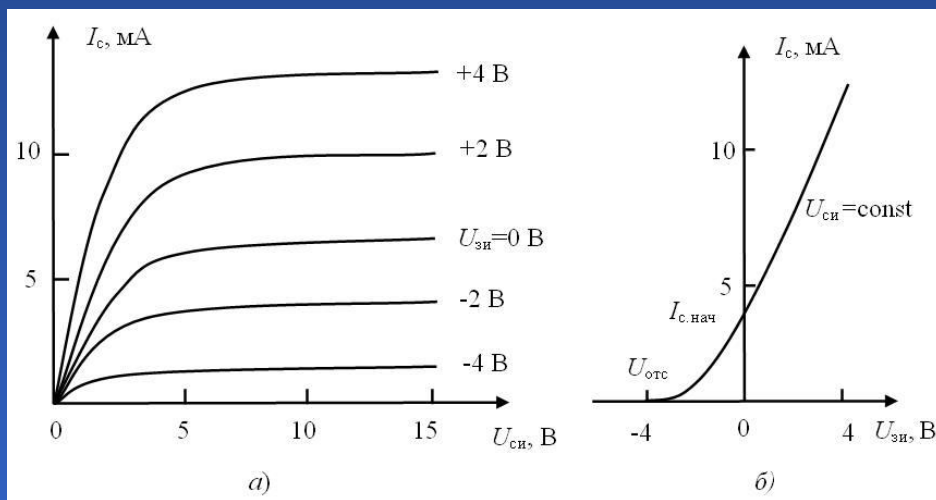
$$R_{вх} = (\partial U_{зи} / \partial I_3)|_{U_{си}} = \text{const.}$$



# Структура и принцип действия МОП-транзистора



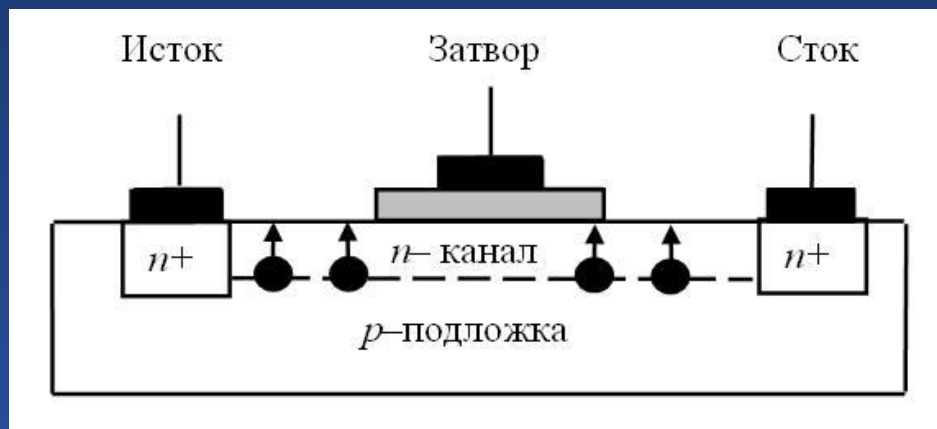
Структура МДП-транзистора со встроенным  $n$ -каналом



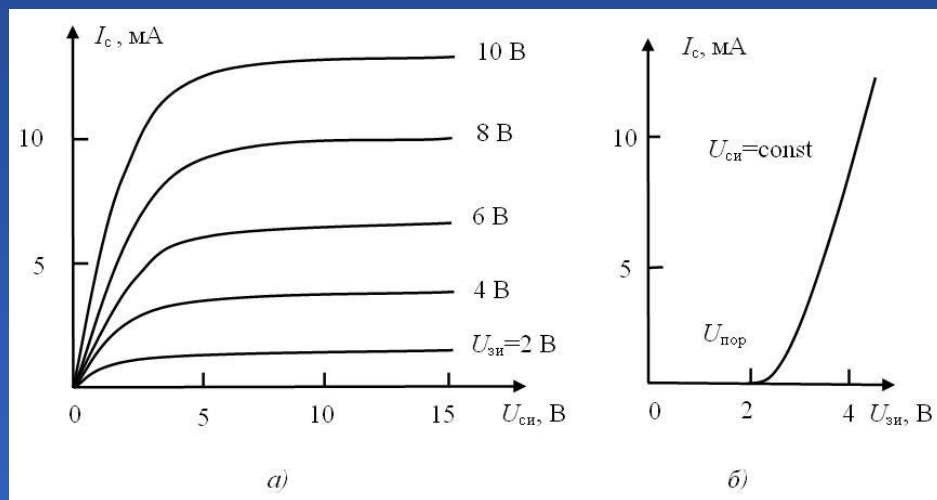
Выходные (а) и передаточные (б) характеристики МОП-транзистора со встроенным каналом



# Структура и принцип действия МОП-транзистора



Структура МОП-транзистора с индуцированным  $n$ -каналом



Выходные (а) и передаточные (б) характеристики МОП-транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа



# Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме

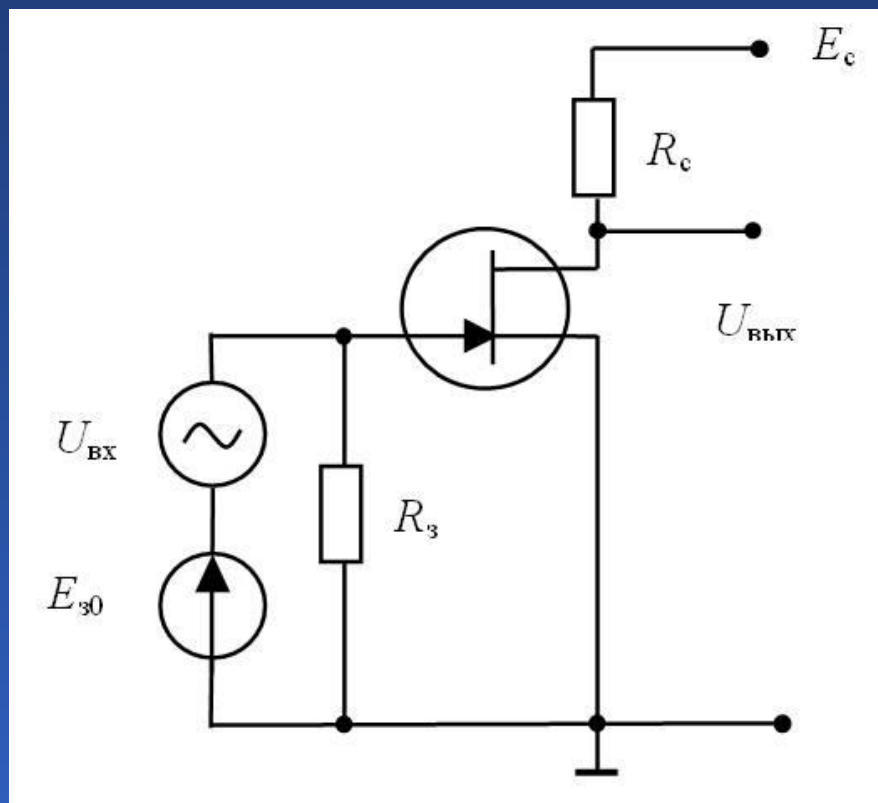
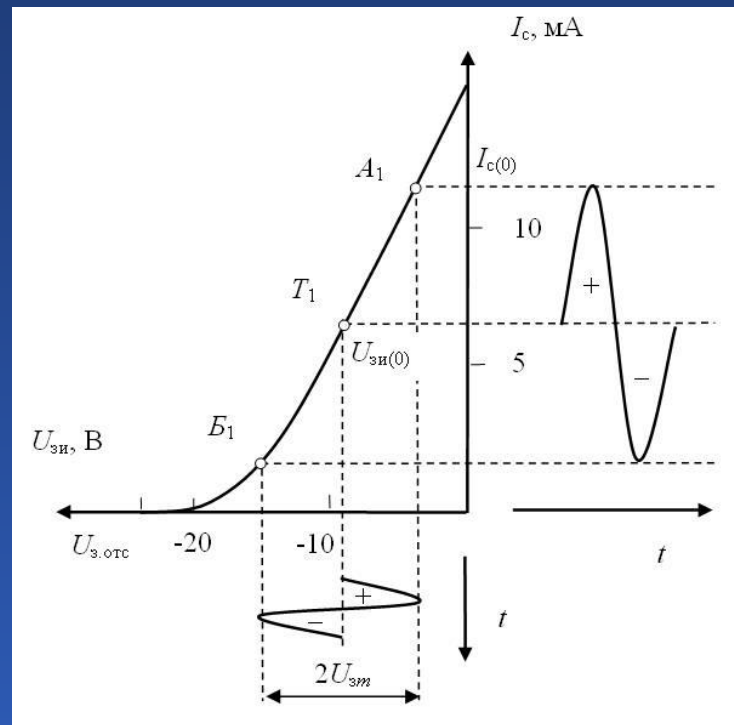
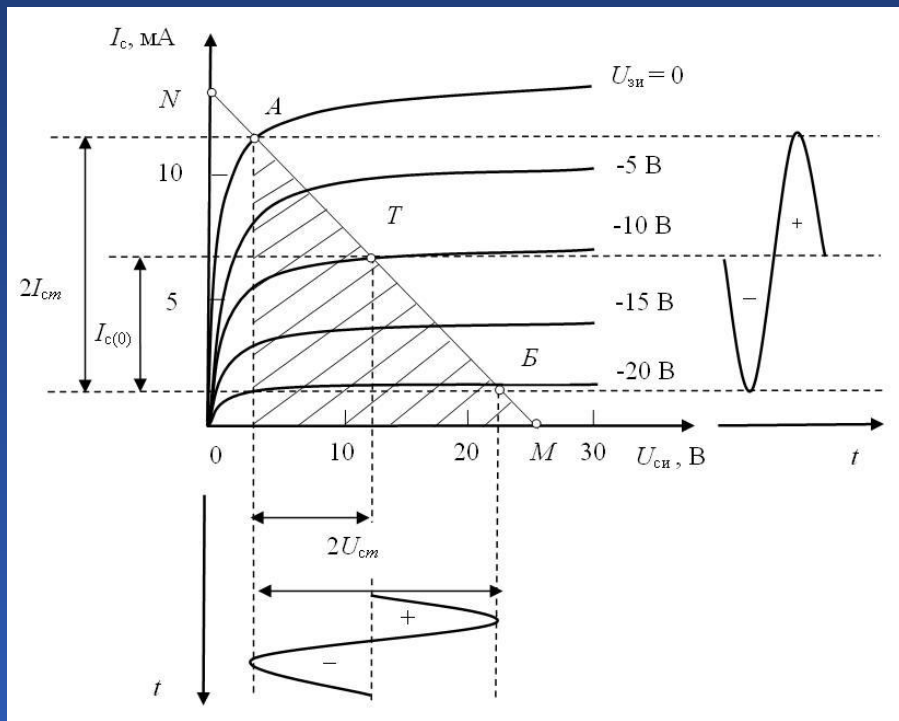


Схема усилительного каскада с общим истоком на полевом транзисторе



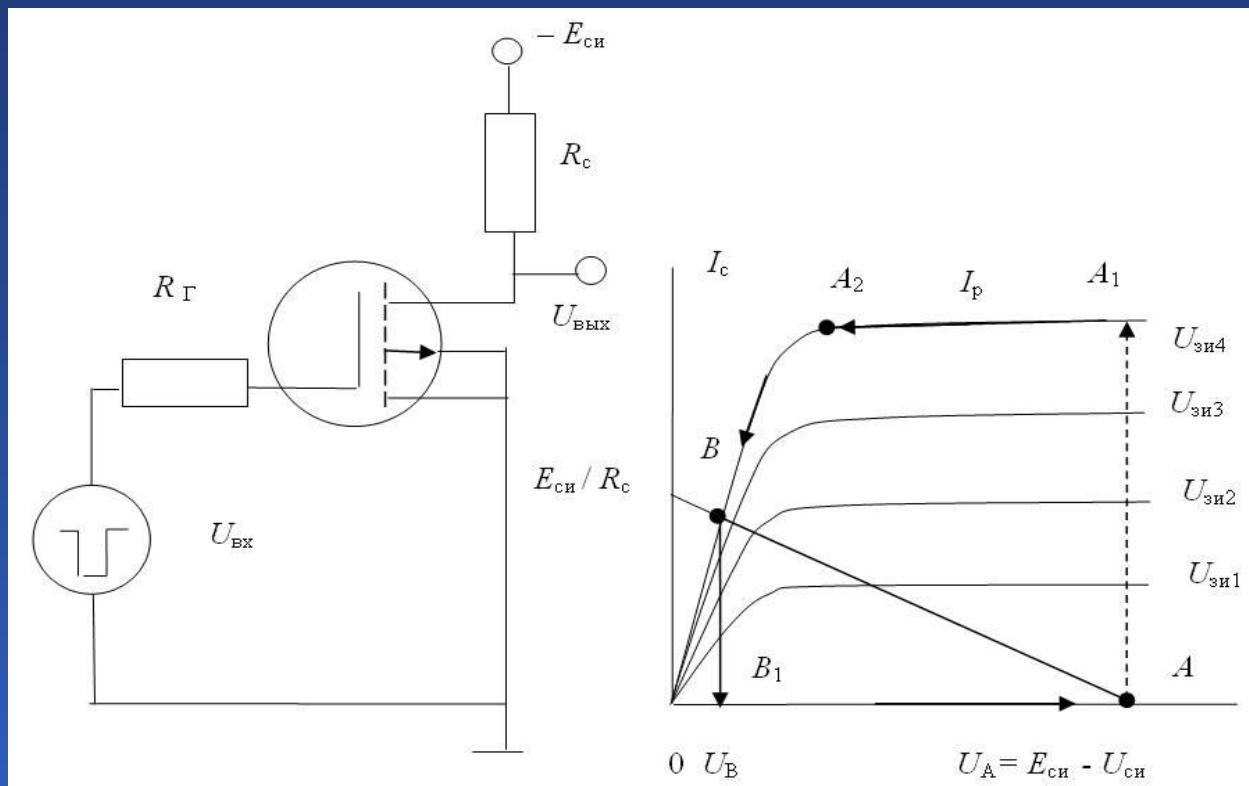
# Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме



К графоаналитическому расчету и анализу режима усиления полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом



# Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме



Статические  
состояния ключа

Ключ на основе  
МДП-транзистора  
с индуцированным  $p$ -каналом

Семейство выходных ВАХ  
и нагрузочная характеристика  
ключа



# Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме

## Процесс включения транзистора

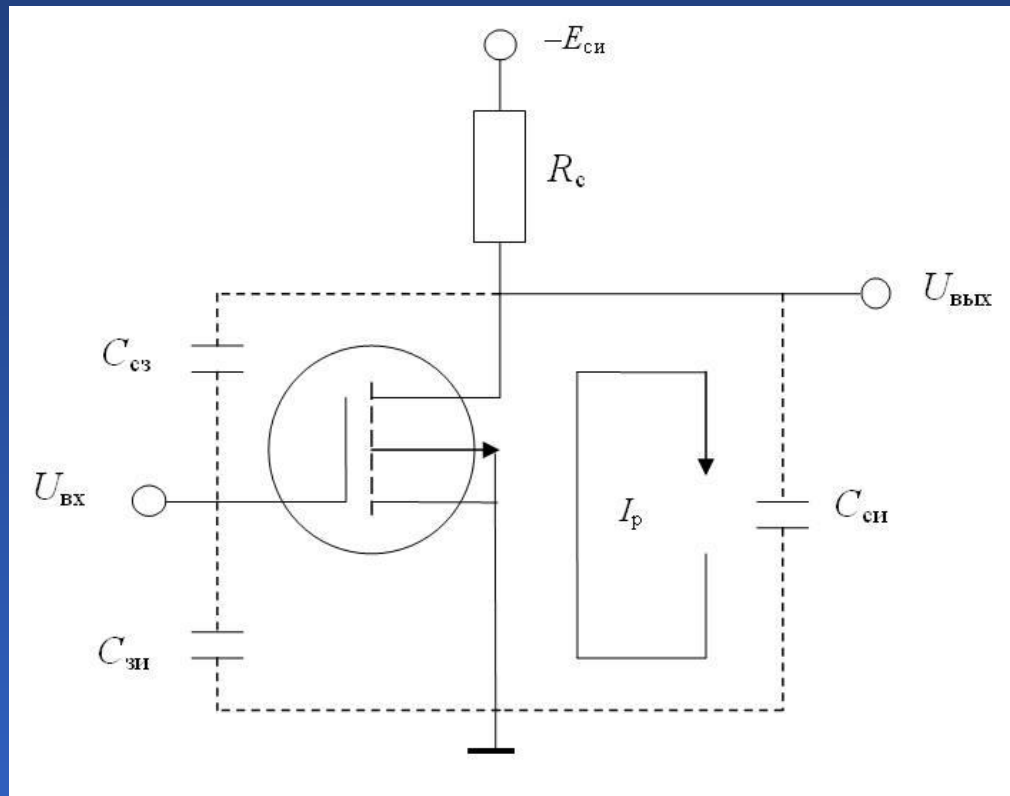
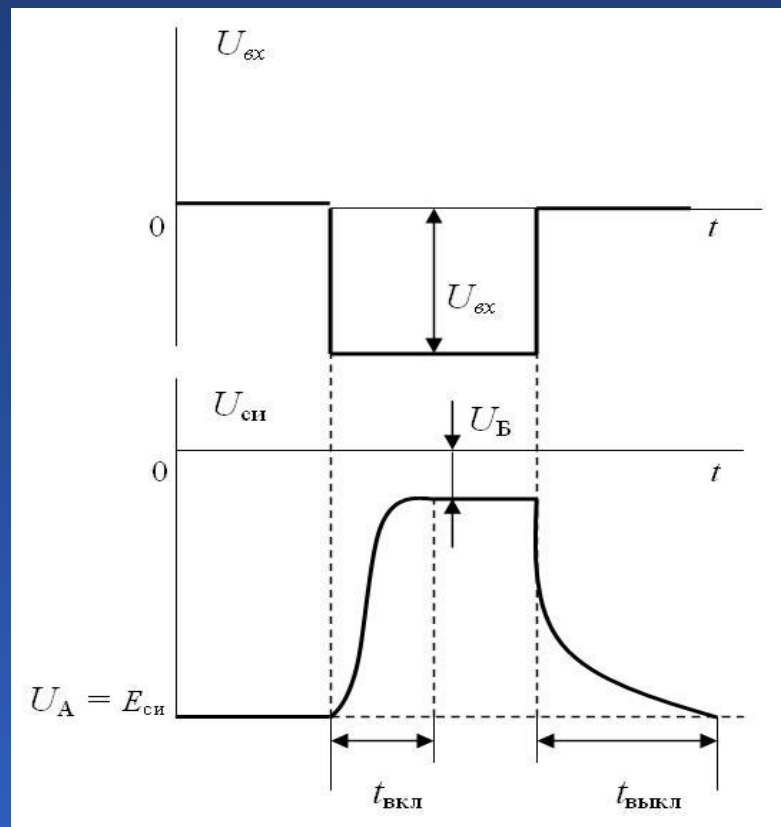


Схема ключа на МДП-транзисторе с учетом паразитных емкостей





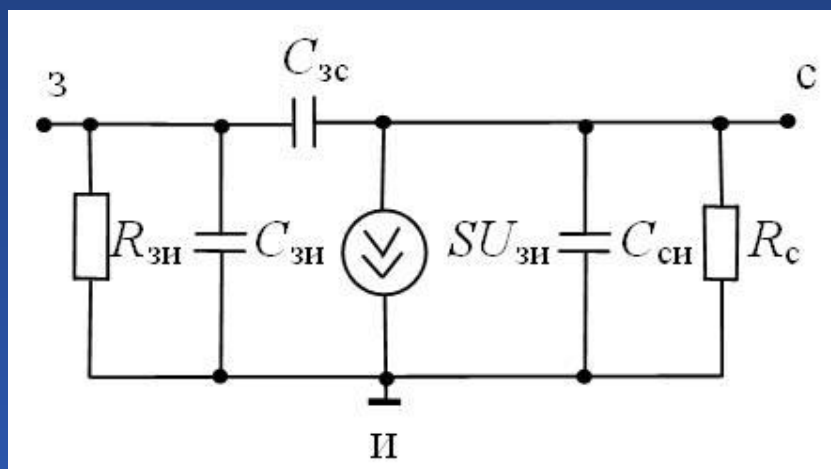
# Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме



Временные диаграммы входного и выходного напряжений



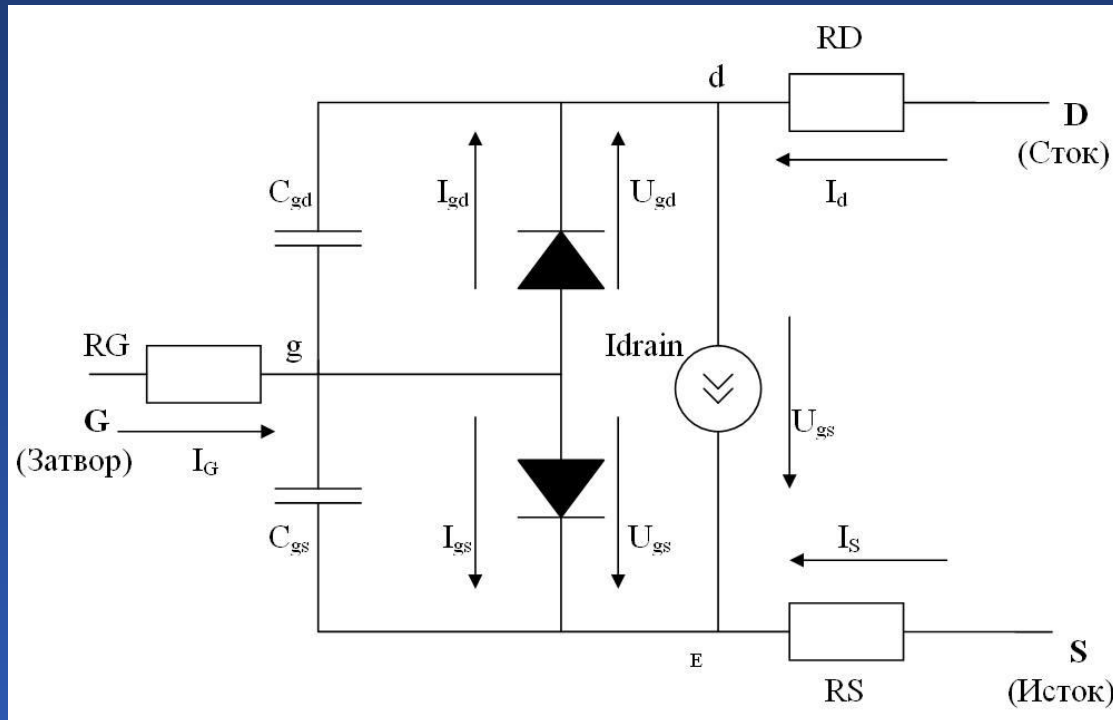
## Линейные и нелинейные модели полевых транзисторов для ВЧ и СВЧ



Малосигнальная  
эквивалентная схема полевого транзистора



## Линейные и нелинейные модели полевых транзисторов для ВЧ и СВЧ



Нелинейная схема замещения полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом



## Тема 6

# Фотоэлектрические и излучательные приборы

Лекция 16



Лекция 17



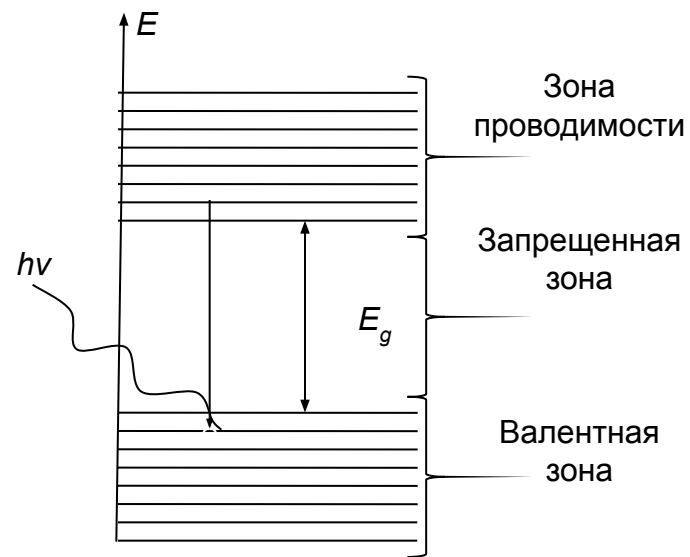
Выбор темы

## Тема 6

# Фотоэлектрические и излучательные приборы

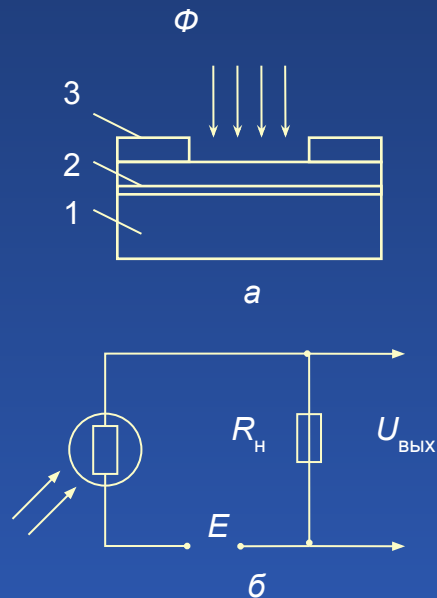
- 6.1. Излучательная генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках под действием излучения
- 6.2. Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение
- 6.3. Гетеропереходы. Зонная модель и инжекционные свойства гетеропереходов
- 6.4. \*Приборы на основе гетеропереходов: светодиоды, полупроводниковые лазеры, фотоэлектрические приемники

# Излучательная генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках под действием излучения

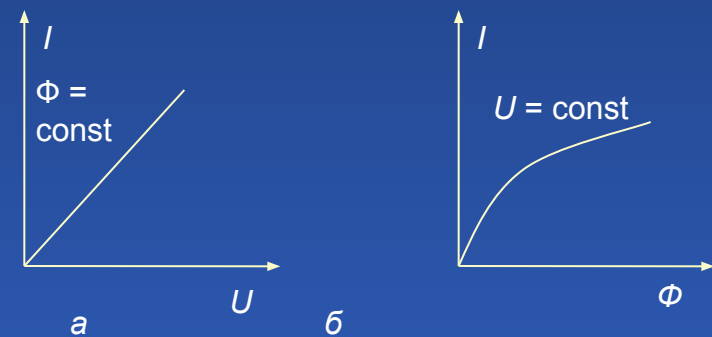


Излучение при рекомбинации

# Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение



Устройство и схема включения фоторезистора



Вольт-амперная (а) и энергетическая (б) характеристики фоторезистора



# Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение

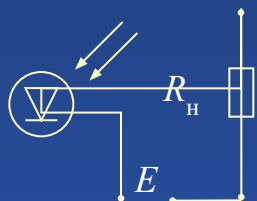
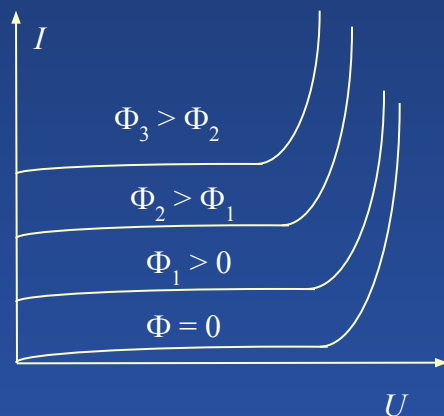
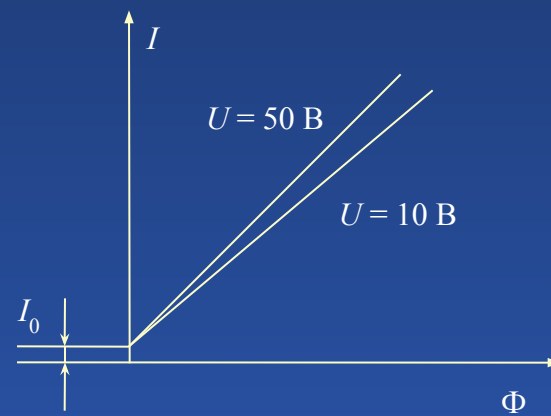


Схема включения фотодиода для работы в фотодиодном режиме



Вольт-амперные характеристики фотодиода для фотодиодного режима

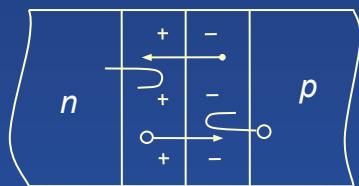


Энергетические характеристики фотодиода

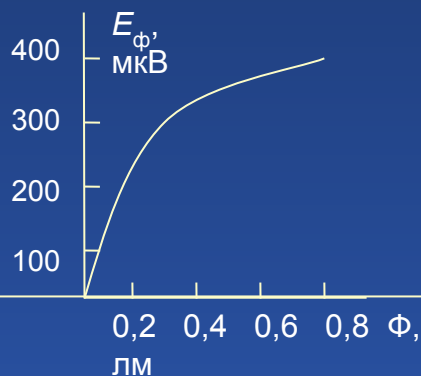




# Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение



Разделение возбужденных светом носителей полем  $p$ - $n$ -перехода



Зависимость фотоЭДС от светового потока

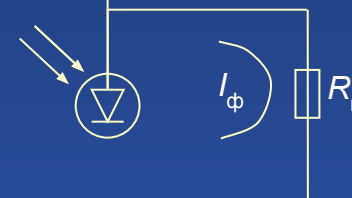
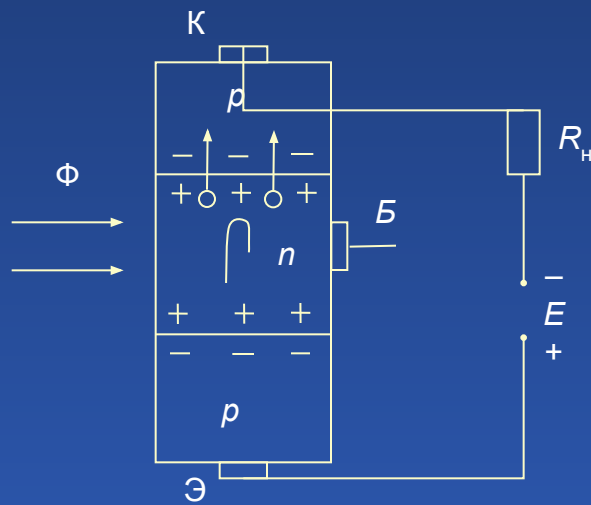


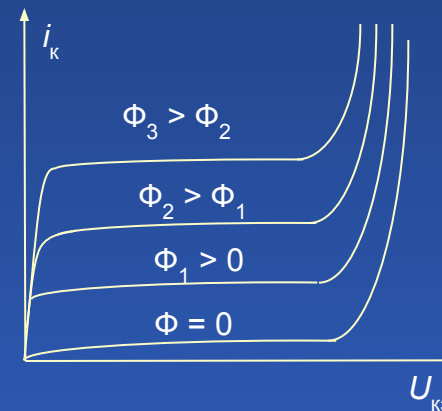
Схема включения фотоэлемента



# Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение



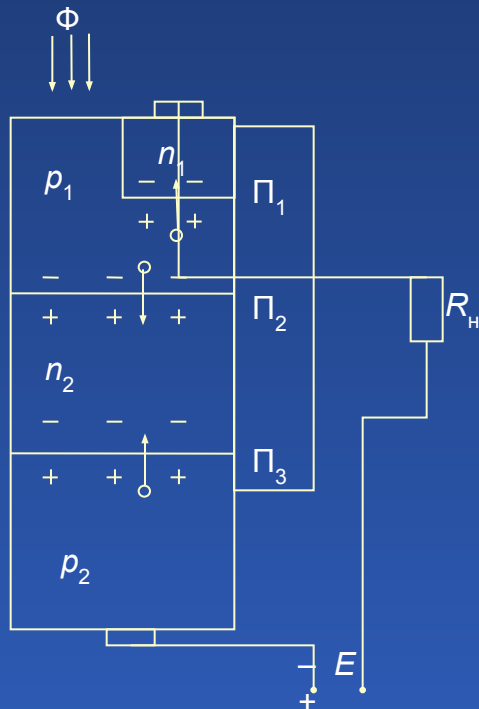
Структура и схема включения фототранзистора со «свободной» базой



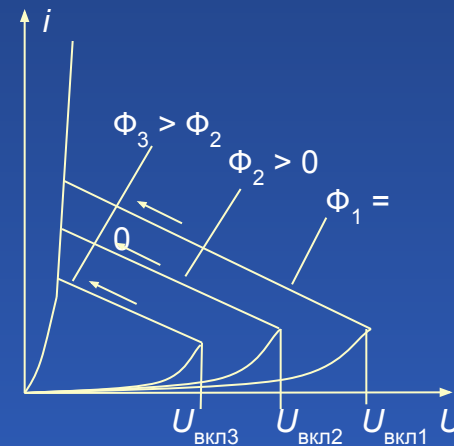
Выходные характеристики фототранзистора



# Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение



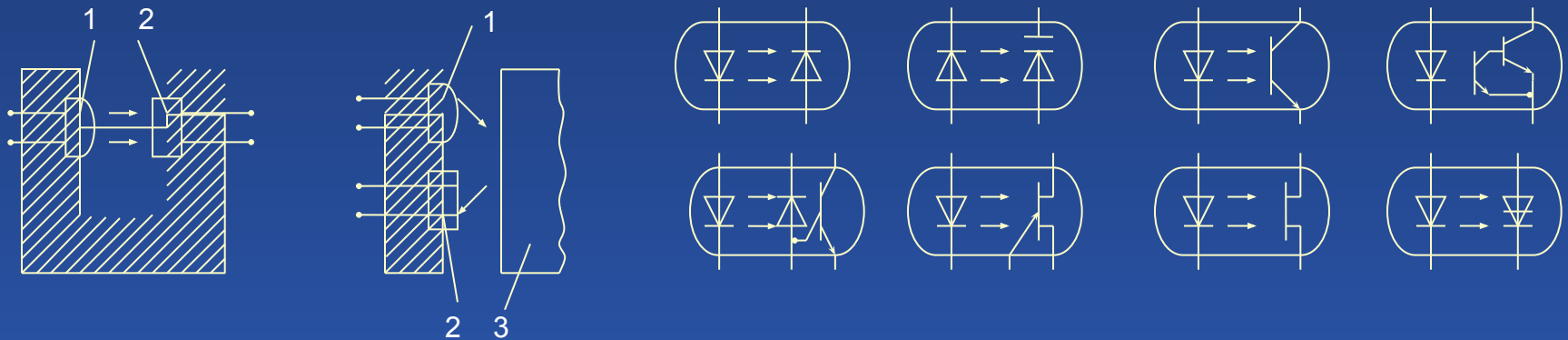
Структура и схема включения фототиристора



Вольт-амперная характеристика фототиристора



# Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение

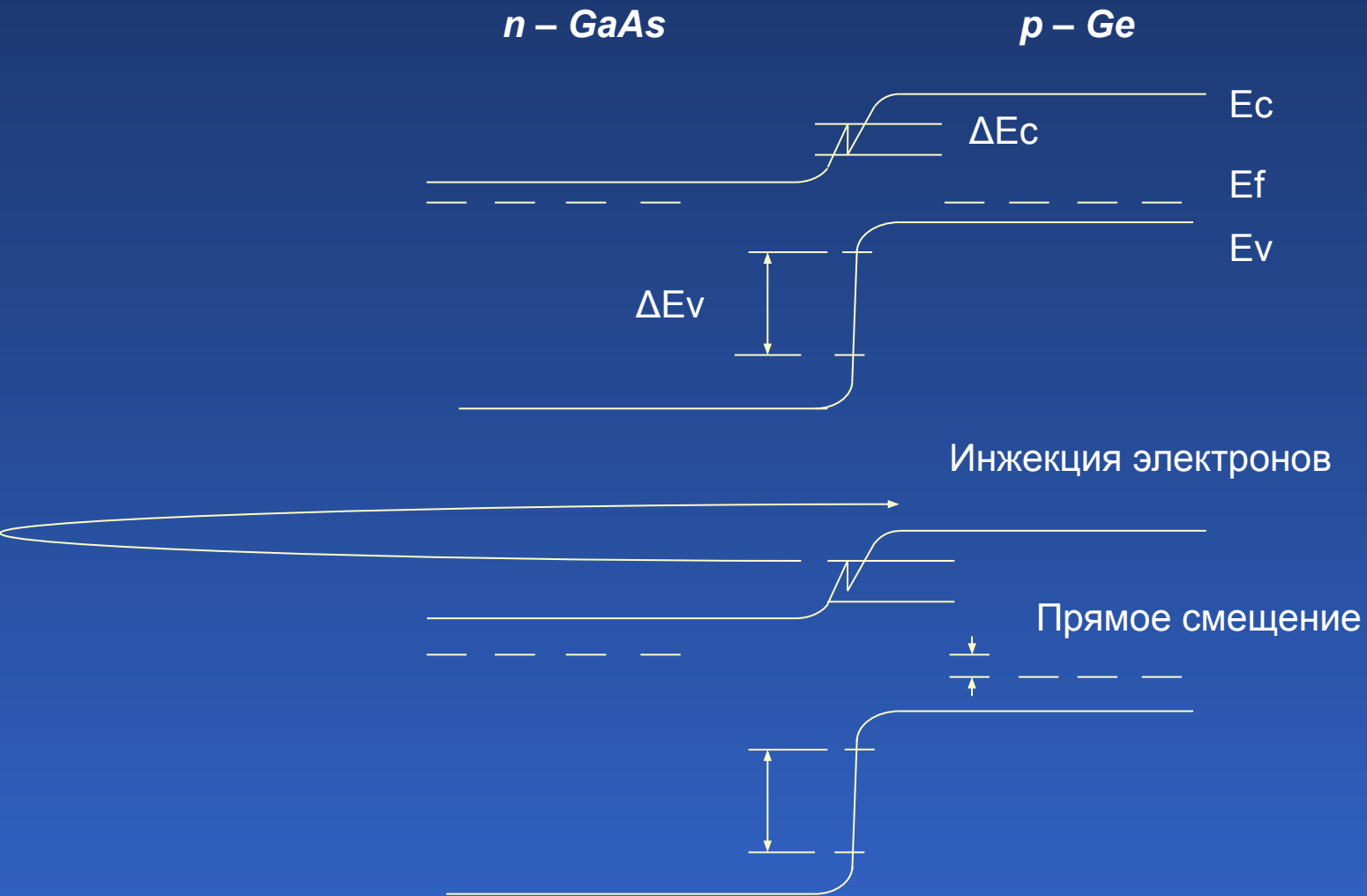


Оптопары с открытым оптическим каналом:  
1 – излучатель; 2 – фотоприемник; 3 – объект

Различные типы оптопар



## Зонная модель и инжекционные свойства гетеропереходов



## Тема 7

# Основы технологии микросэлектронных изделий. Базовые ячейки аналоговых и цифровых интегральных схем

Лекция 18 

Лекция 19 

Выбор темы

## Тема 7

# Основы технологии микроэлектронных изделий. Базовые ячейки аналоговых и цифровых интегральных схем

- 7.1. Предмет микроэлектроники. Классификация интегральных схем
- 7.2. Технология полупроводниковых интегральных схем
  - 7.2.1. Подготовительные операции
  - 7.2.2. Эпитаксия
  - 7.2.3. Термическое окисление
  - 7.2.4. Легирование
  - 7.2.5. Травление
  - 7.2.6. Техника масок
  - 7.2.7. Нанесение тонких пленок
  - 7.2.8. Металлизация
  - 7.2.9. Сборочные операции
- 7.3. Технология тонкопленочных гибридных интегральных схем
- 7.4. Технология толстопленочных гибридных интегральных схем

## Подготовительные операции

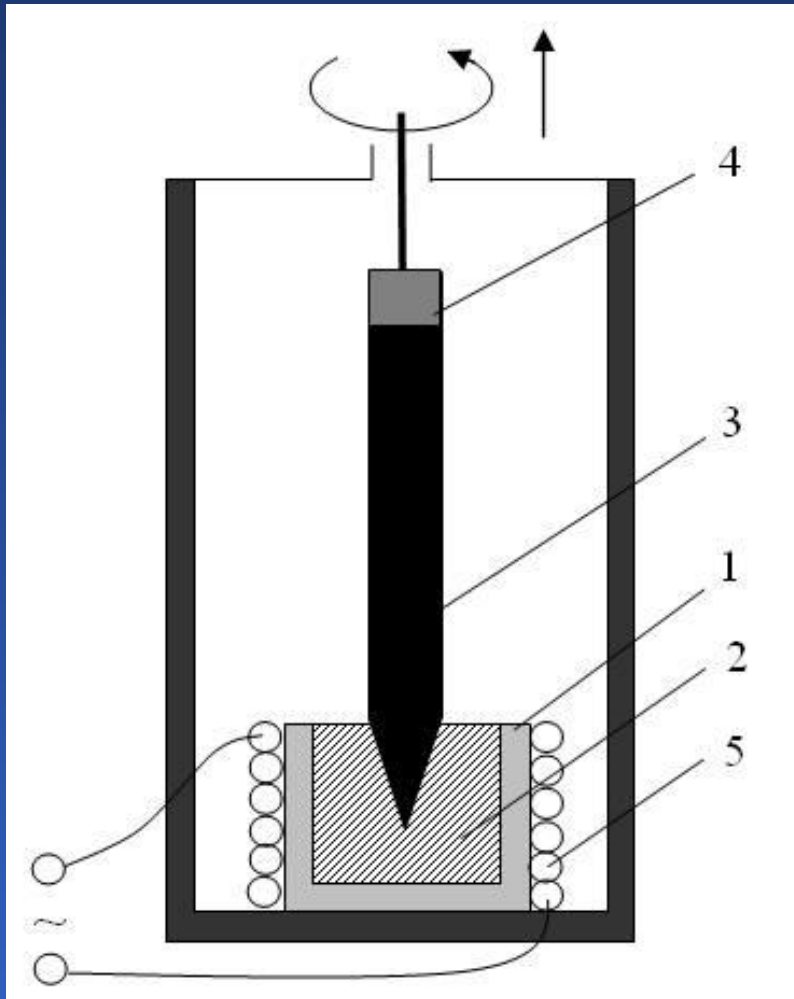
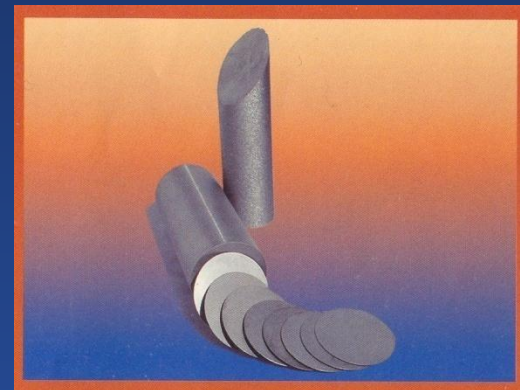
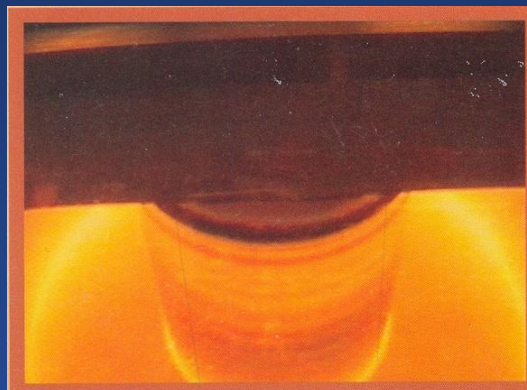


Схема выращивания монокристаллов методом Чохральского: 1 – тигель; 2 – расплав полупроводника; 3 – монокристалл выращиваемого полупроводника; 4 – затравка; 5 – катушка высокочастотного индуктора





## Подготовительные операции



## Эпитаксия

**Эпитаксией** называют процесс наращивания монокристаллических слоев на подложку, при котором кристаллографическая ориентация наращиваемого слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки.

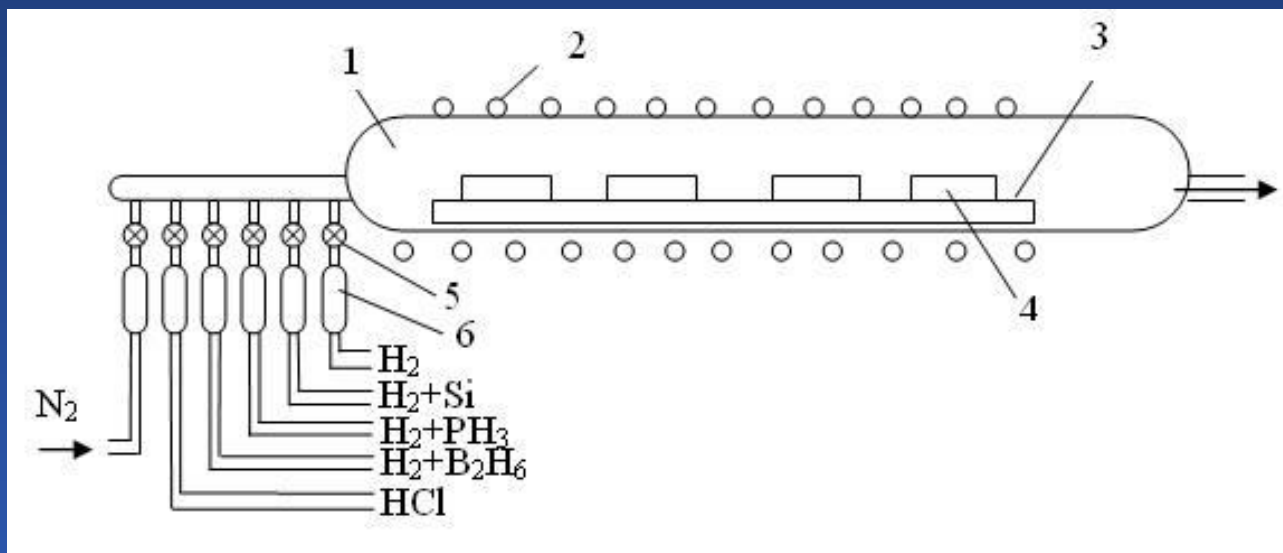
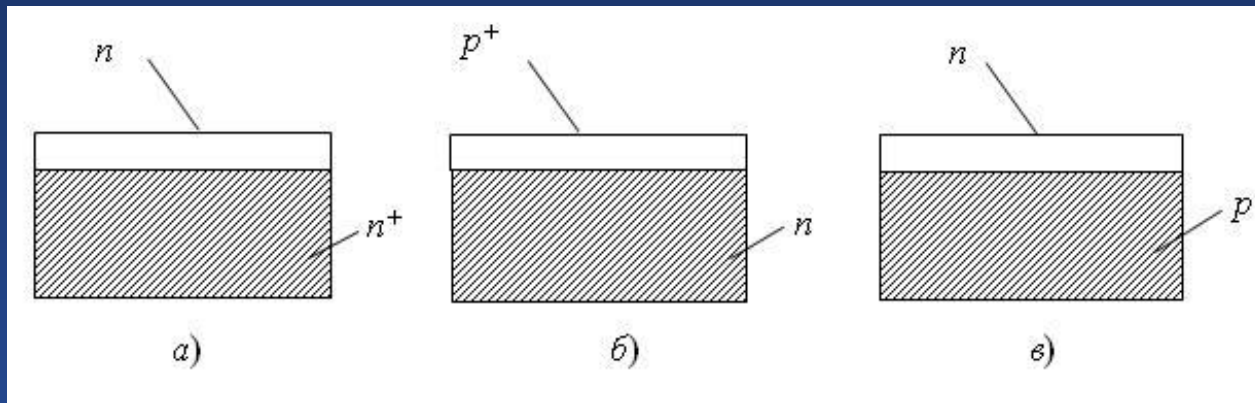


Схема хлоридного процесса эпитаксии: **1** – кварцевая труба; **2** – катушка ВЧ-нагрева; **3** – тигель с пластинами; **4** – пластина кремния; **5** – вентиль для перекрытия соответствующего газа; **6** – измеритель скорости потока





Примеры эпитаксиальных структур:  
**а** – пленка  $n$ -типа на  $n^+$ -подложке;  
**б** – пленка  $p^+$ -типа на  $n$ -подложке;  
**в** – пленка  $n$ -типа на  $p$ -подложке



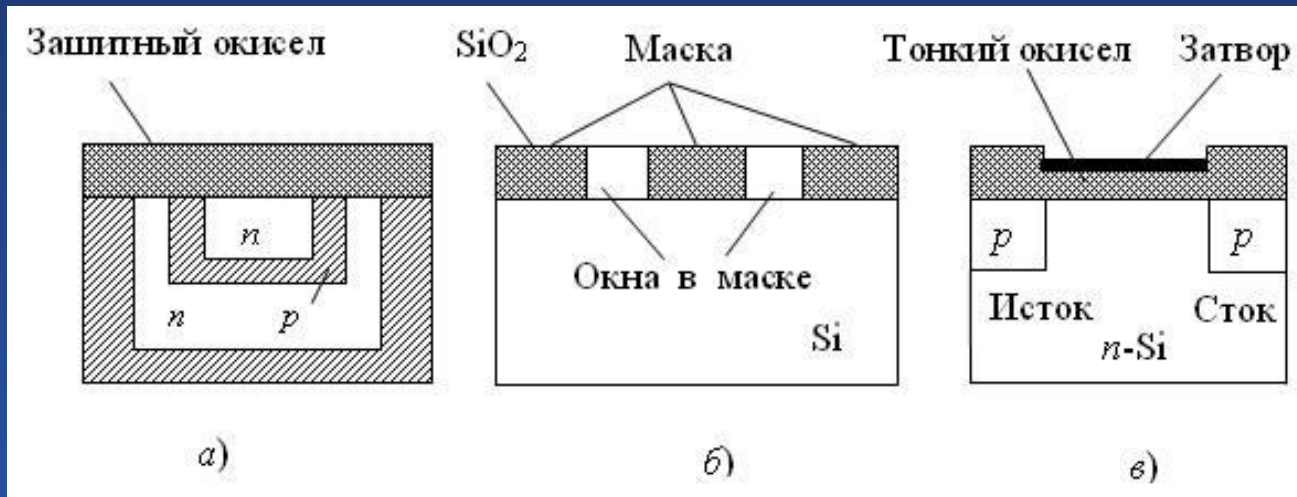
## Термическое окисление

**Окисление кремния** – один из самых характерных процессов в технологии современных ИС. Получаемая при этом пленка двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) выполняет несколько важных функций, в том числе:

- функцию защиты – *пассивации* поверхности и, в частности, защиты вертикальных участков *p-n*-переходов, выходящих на поверхность;
- функцию маски, через окна которой вводятся необходимые примеси;
- функцию диэлектрика под затвором МОП-транзистора.



# Термическое окисление



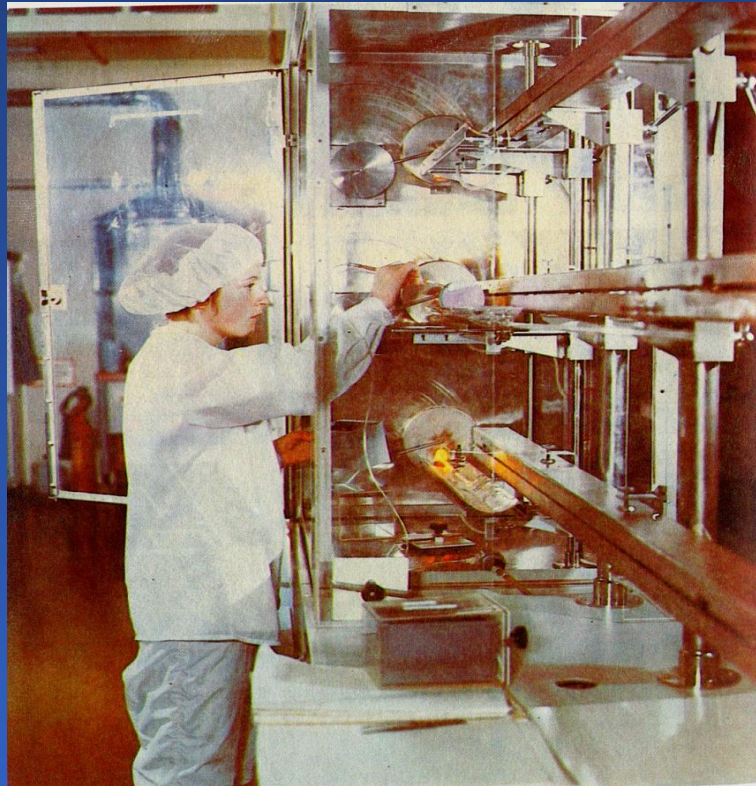
Функции двуокисной пленки кремния:  
**а** – пассивация поверхности; **б** – маска для локального легирования; **в** – тонкий подзатворный окисел





## Легирование

Внедрение примесей в исходную пластину (или в эпитаксиальный слой) путем диффузии при высокой температуре является исходным и до сих пор основным способом легирования полупроводников с целью создания диодных и транзисторных структур.



## Легирование

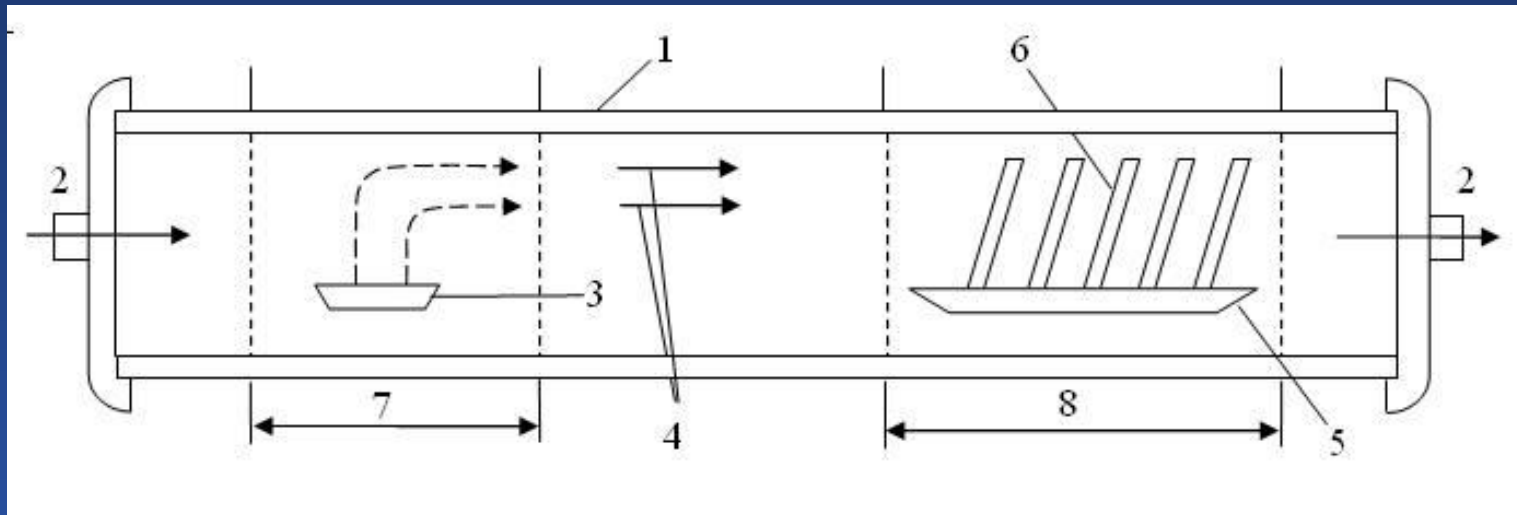
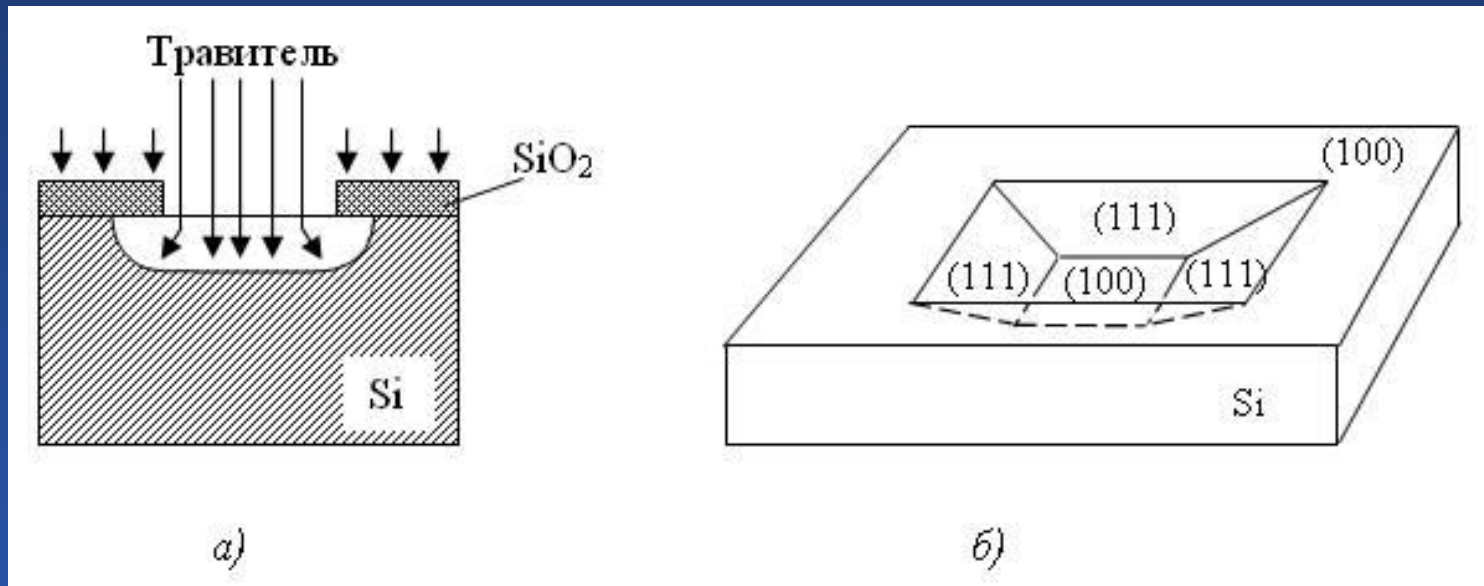


Схема двухзонной диффузионной печи:

- 1 – кварцевая труба; 2 – поток газа-носителя; 3 – источник диффузанта;
- 4 – пары источника диффузанта; 5 – тигель с пластинами;
- 6 – пластина кремния; 7 – первая высокотемпературная зона;
- 8 – вторая высокотемпературная зона



# Травление



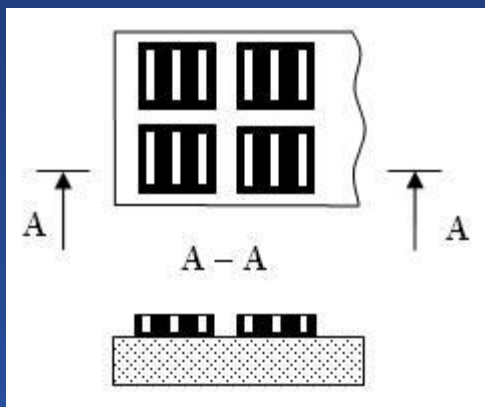
Локальное травление кремния: а – изотропное; б – анизотропное



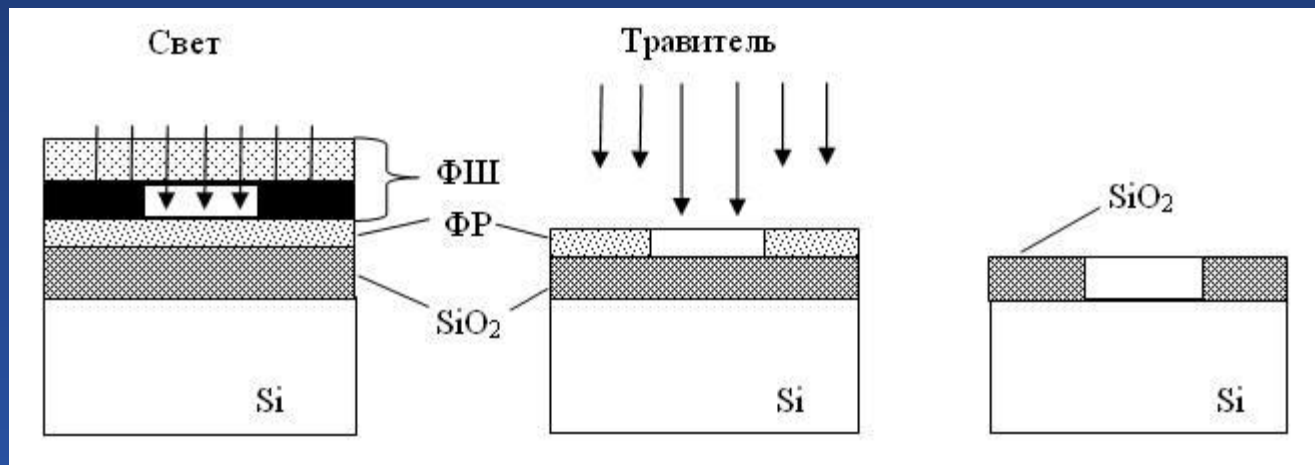


# Техника масок

## Фотолитография



Фрагмент  
фотошаблона



Этапы процесса фотолитографии:

- а** – экспозиция фоторезиста через фотошаблон;
- б** – локальное травление двуоксида кремния через фоторезистивную маску;
- в** – окисная маска после удаления фоторезиста



## Нанесение тонких пленок

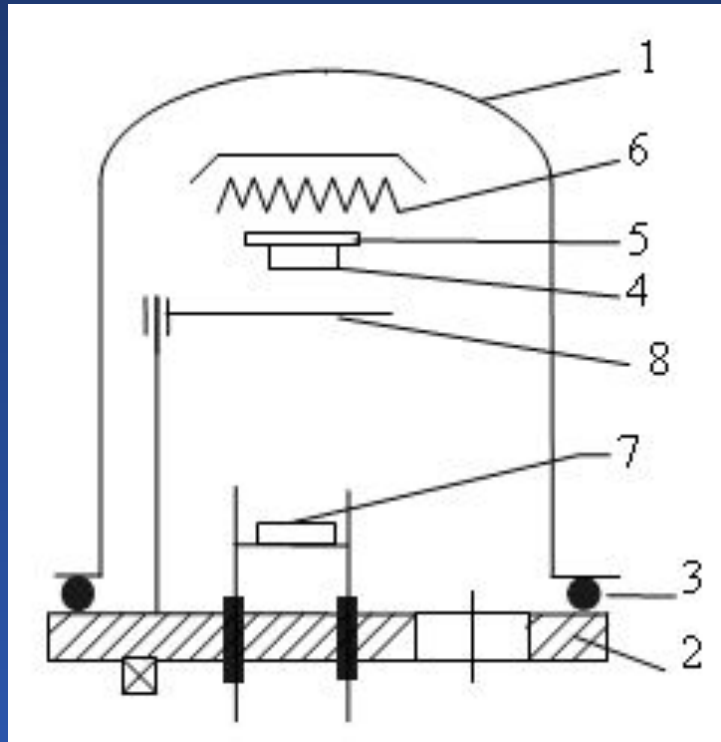


Схема установки термического напыления

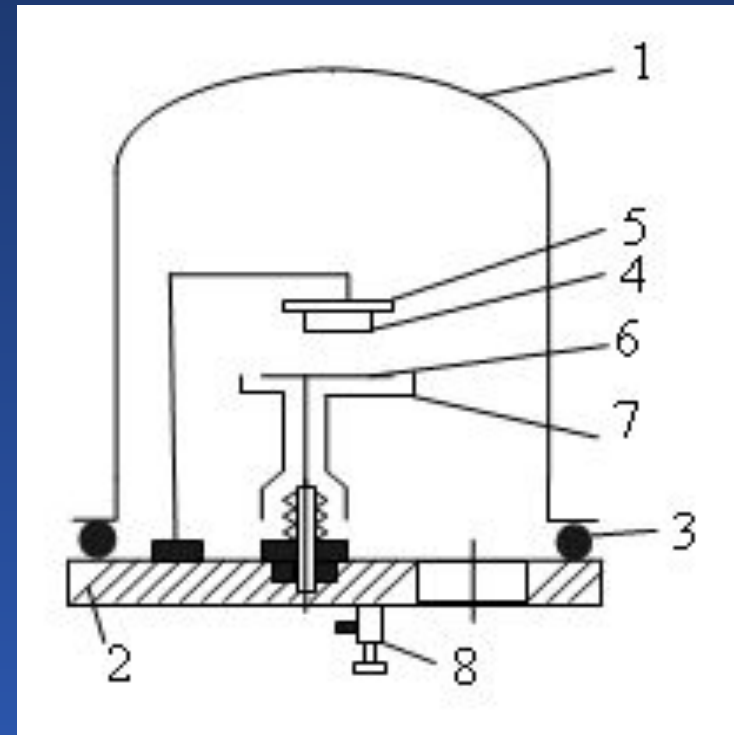


Схема установки катодного напыления



## Нанесение тонких пленок

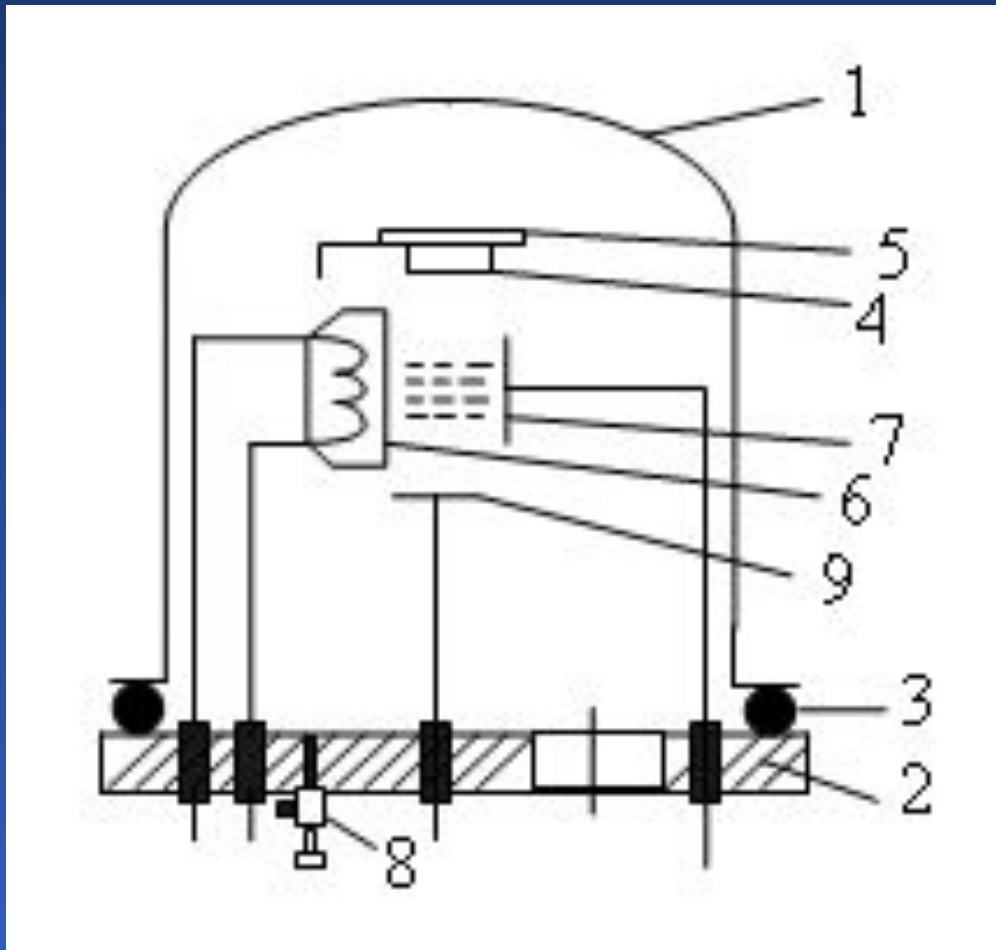
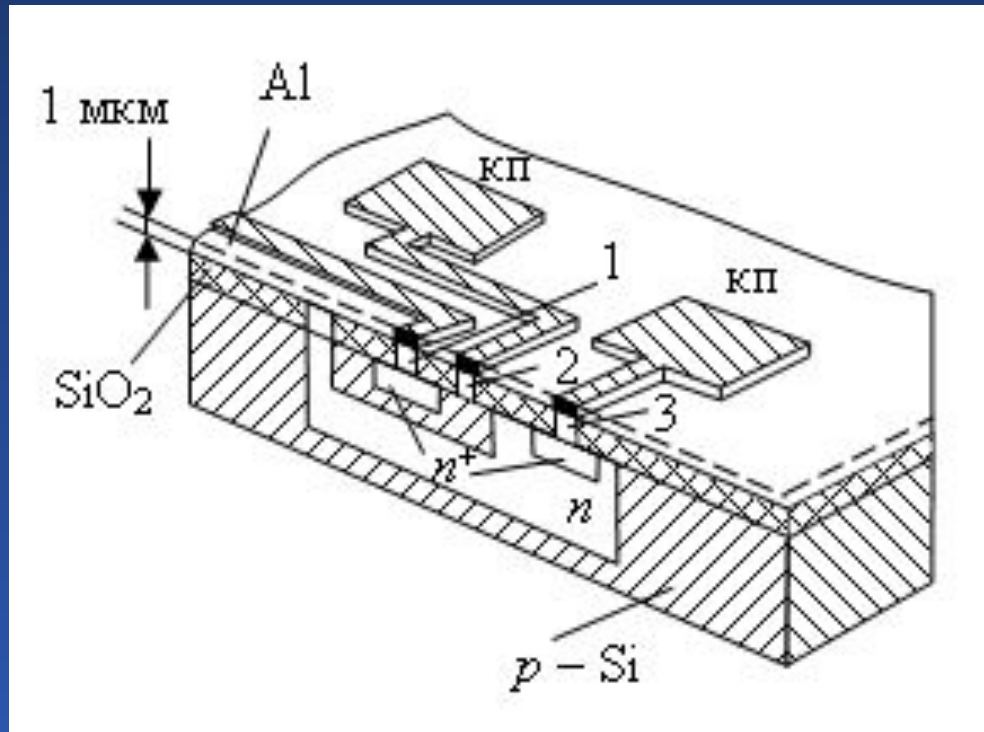


Схема установки ионно-плазменного напыления



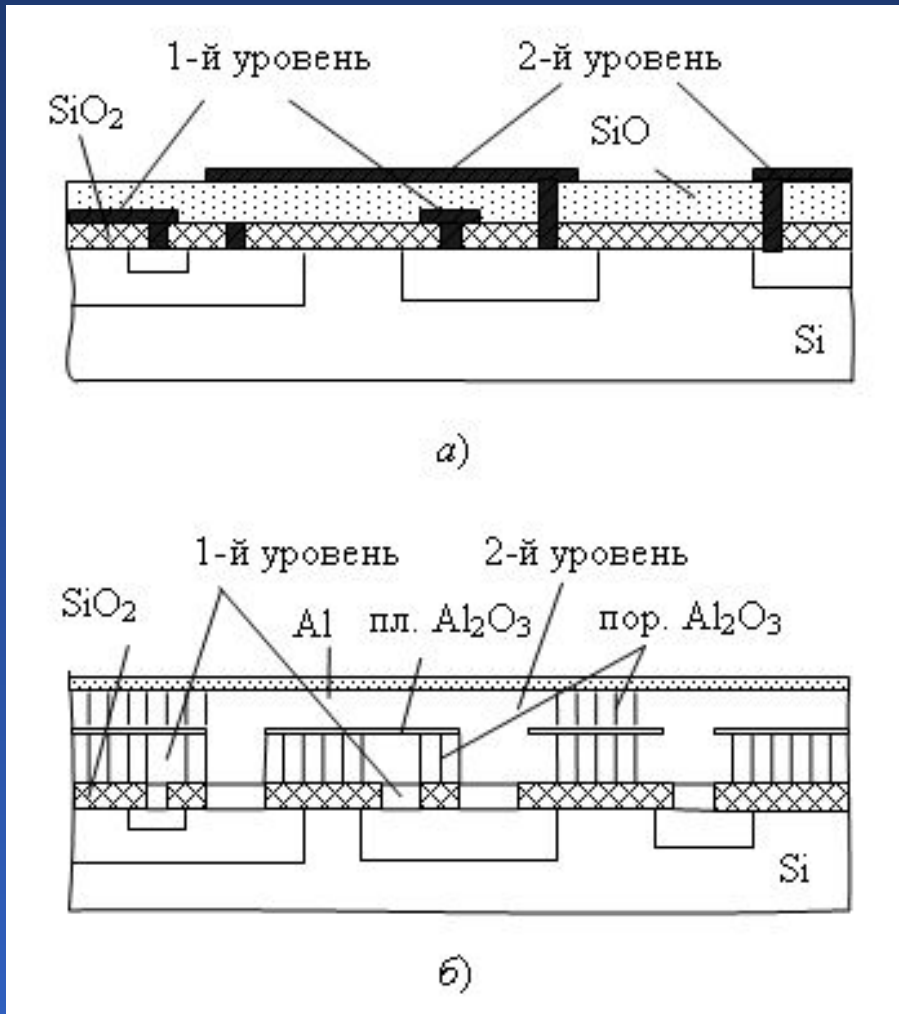
# Металлизация



Получение металлической разводки методом фотолитографии



# Металлизация

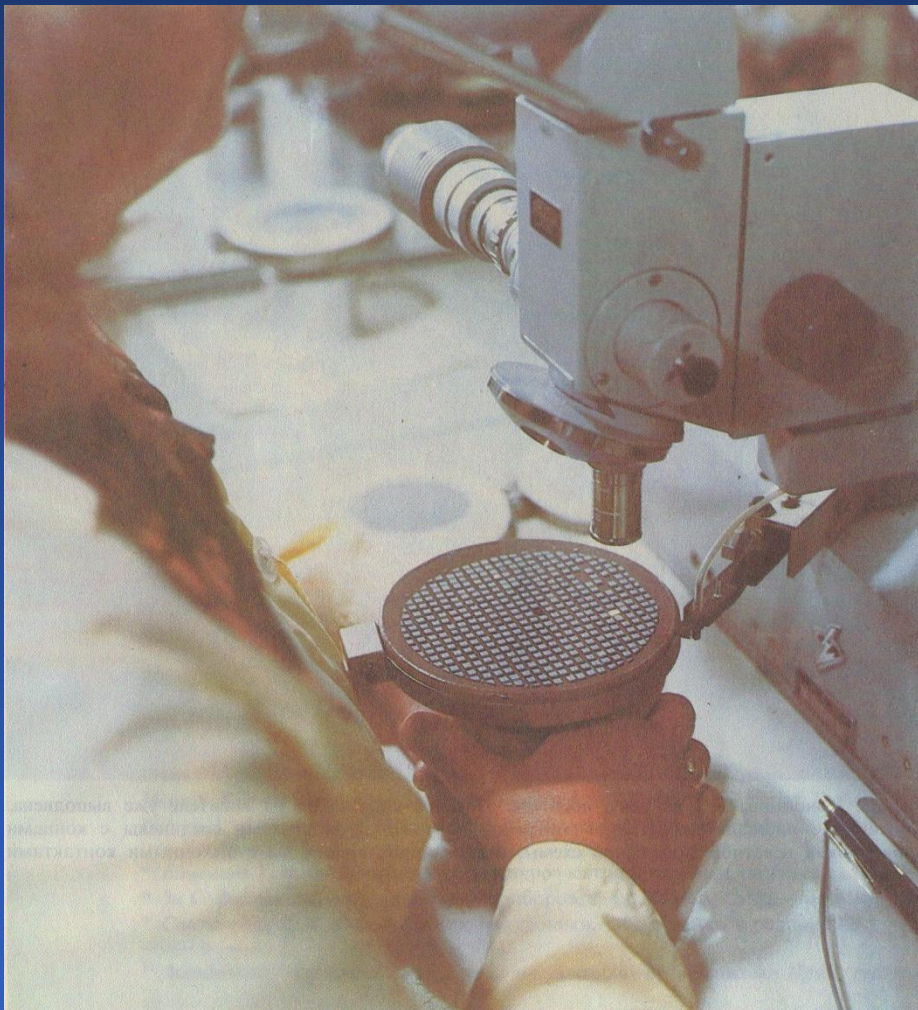


Многослойная металлическая разводка

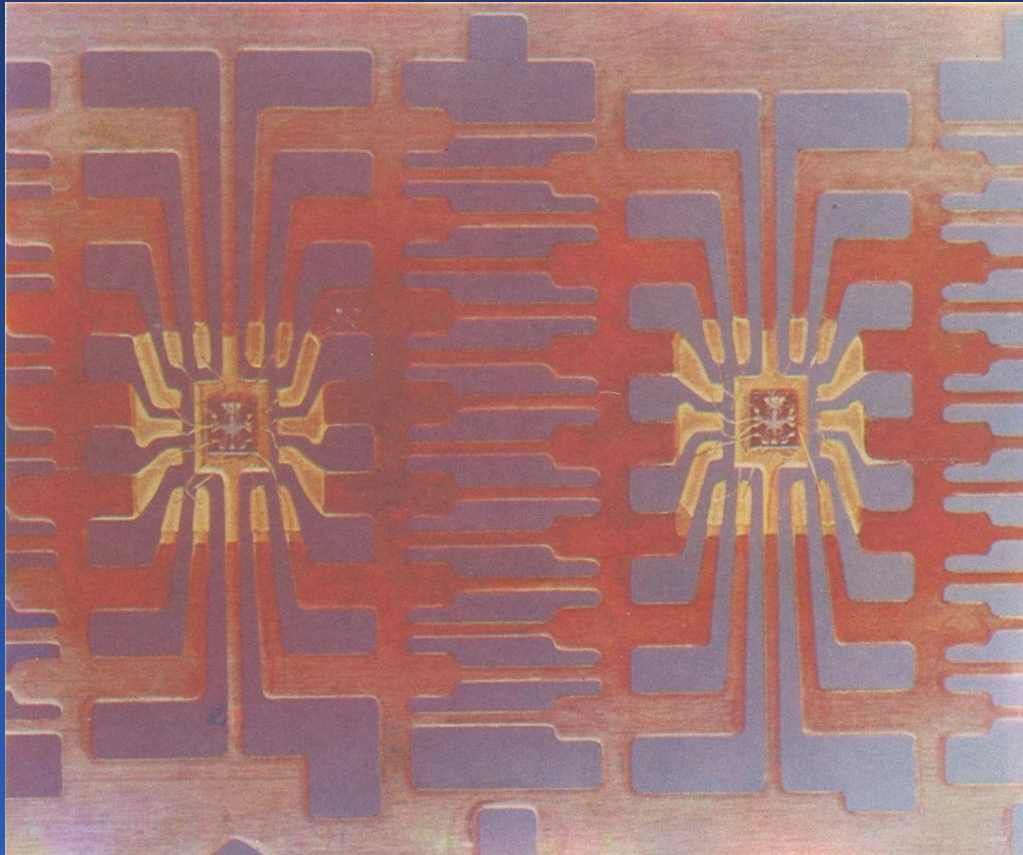




## Сборочные операции



## Сборочные операции



Монтаж кристалла  
на ножке корпуса



## Тема 8

# Основные типы электровакуумных приборов, их принципы работы и применение

Лекция 24



Лекция 25



Выбор темы



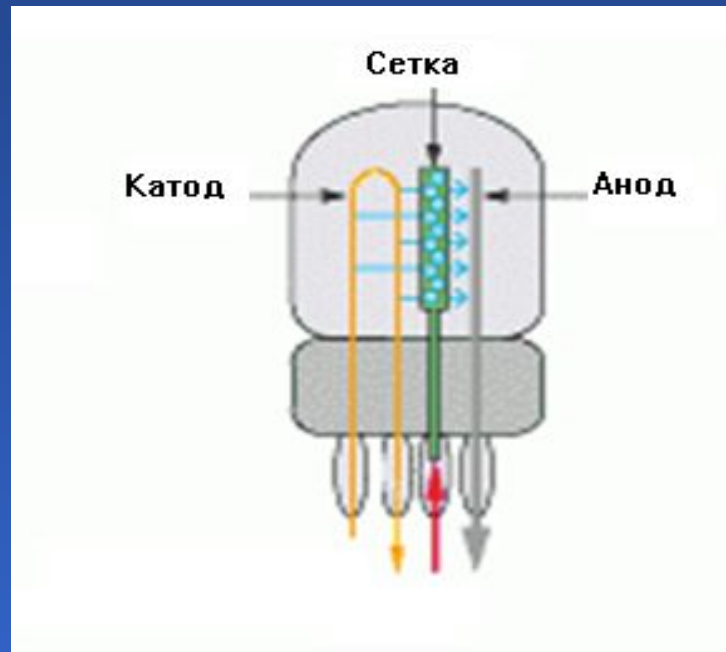
## Тема 8

# Основные типы электровакуумных приборов, их принципы работы и применение

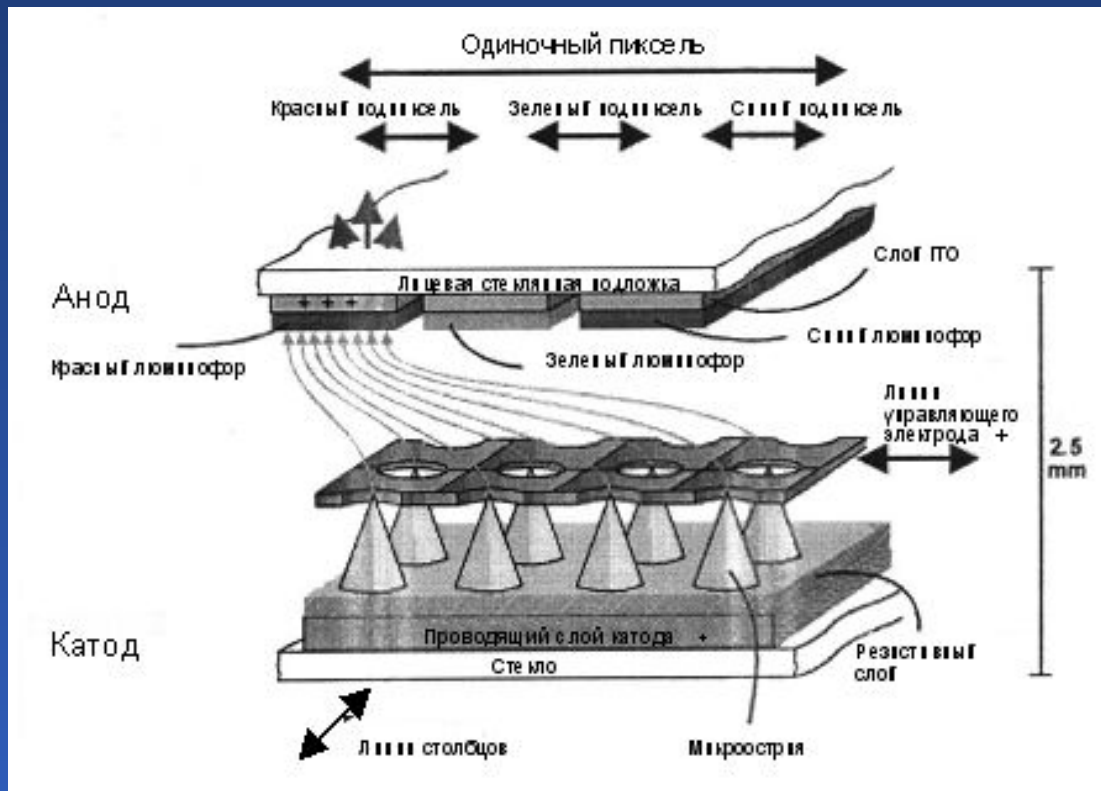
- 8.1. Электровакуумные приборы – общие сведения, классификация
- 8.2. Физические основы работы электровакуумных приборов
- 8.3. Приборы на основе термоэлектронной эмиссии
- 8.4. Приборы на основе автоэлектронной эмиссии

## Электровакуумные приборы: общие сведения, классификация

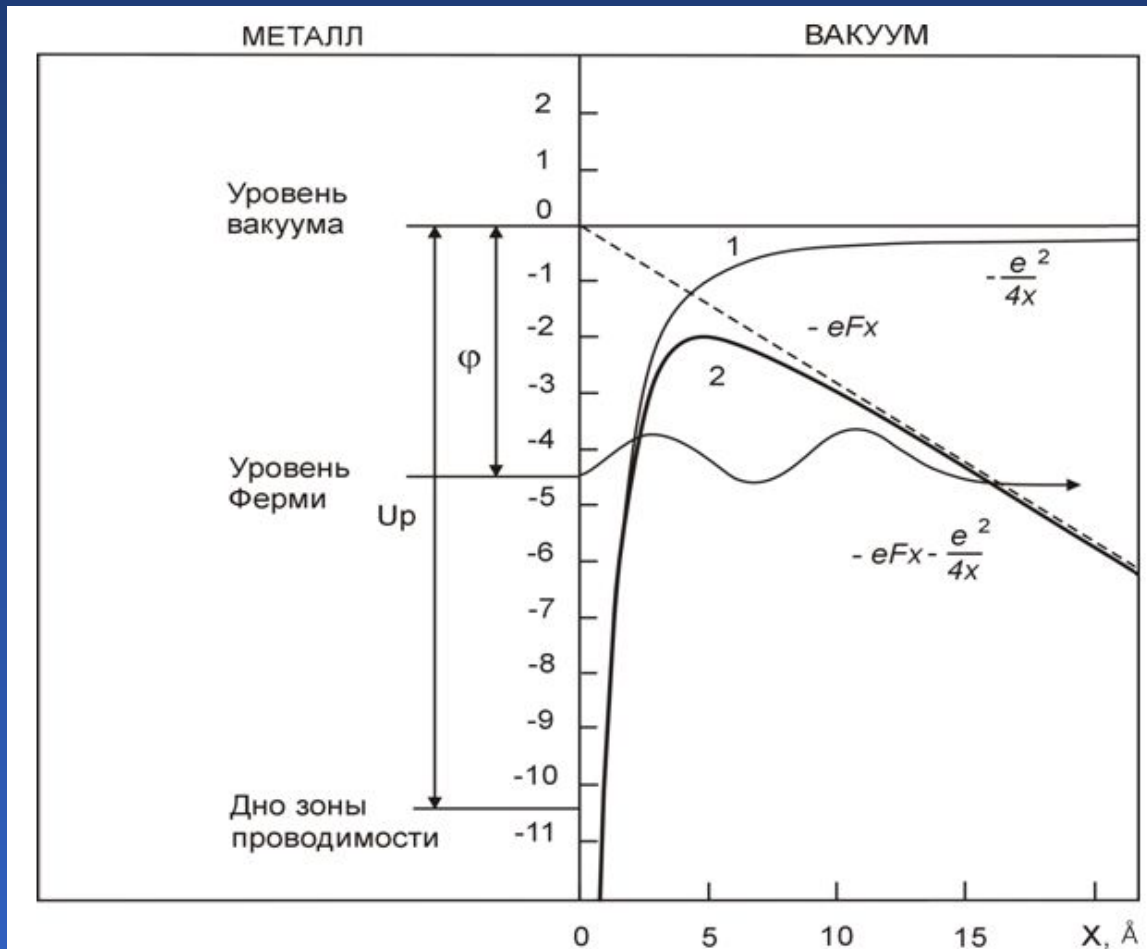
Электровакуумными приборами (ЭВП) называют приборы, в которых рабочее пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (пары или газы) и действие которых основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе.



# Электровакuumные приборы: общие сведения, классификация



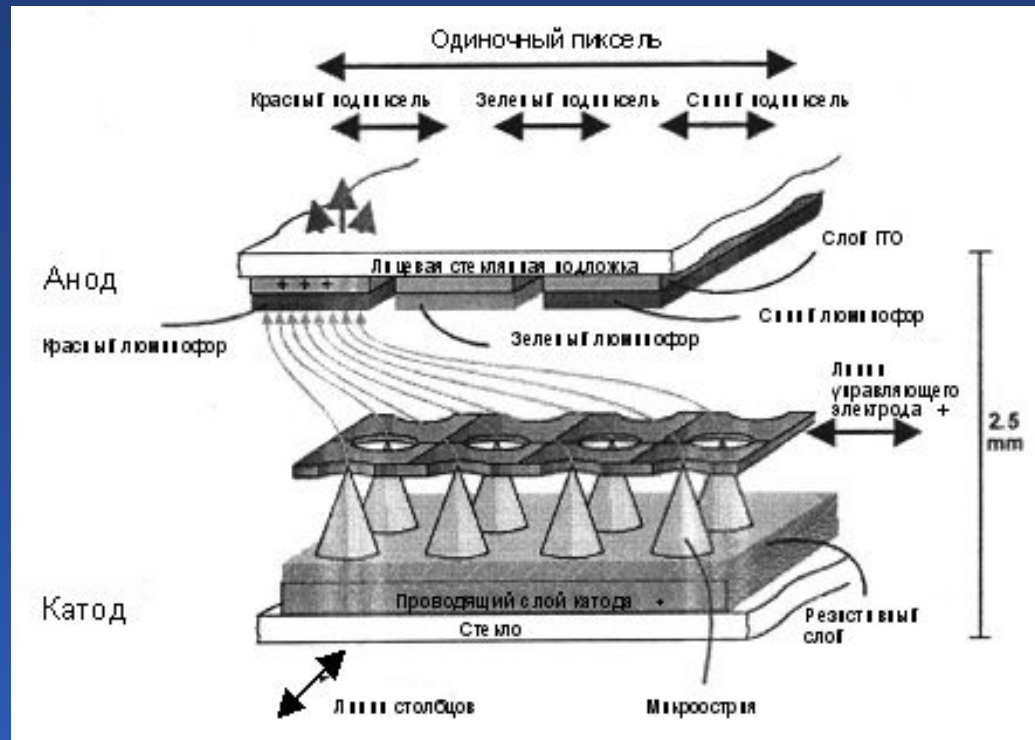
# Физические основы работы электровакуумных приборов



Потенциальный барьер на границе металл–вакуум:  
1 – потенциал сил зеркального изображения,  
2 – потенциальный барьер в сильном электрическом поле.  
Уровень Ферми – энергия, соответствующая максимальной энергии электрона в металле при температуре абсолютного нуля



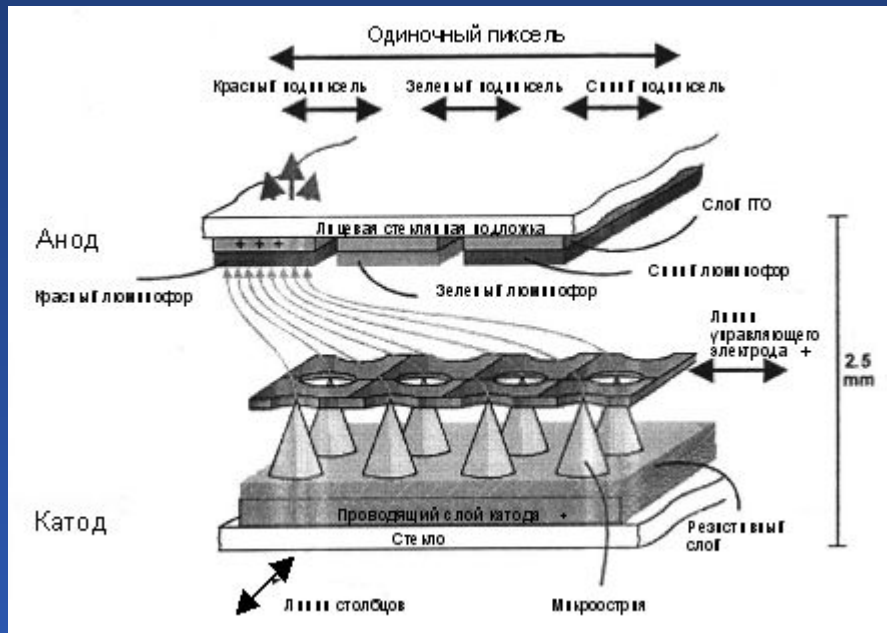
# Приборы на основе автоэлектронной эмиссии



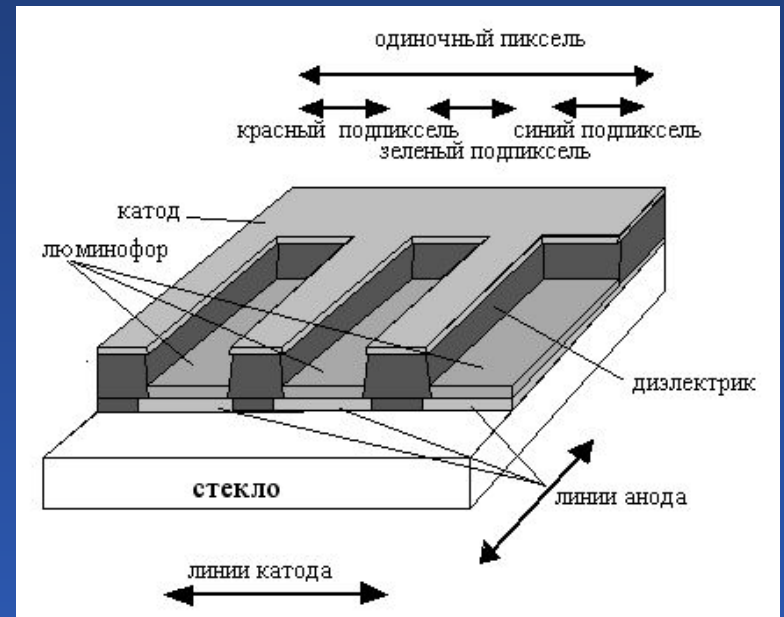
Схематическое изображение автоэмиссионного катода Спиндта



# Приборы на основе автоэлектронной эмиссии



Конструкция полевого эмиссионного дисплея с катодами острой формы



Конструкция полевого эмиссионного дисплея с катодами планарного типа



## Тема 9

# Перспективы развития электроники. Нанoeлектроника – исторический этап развития электроники

Лекция 26



Выбор темы

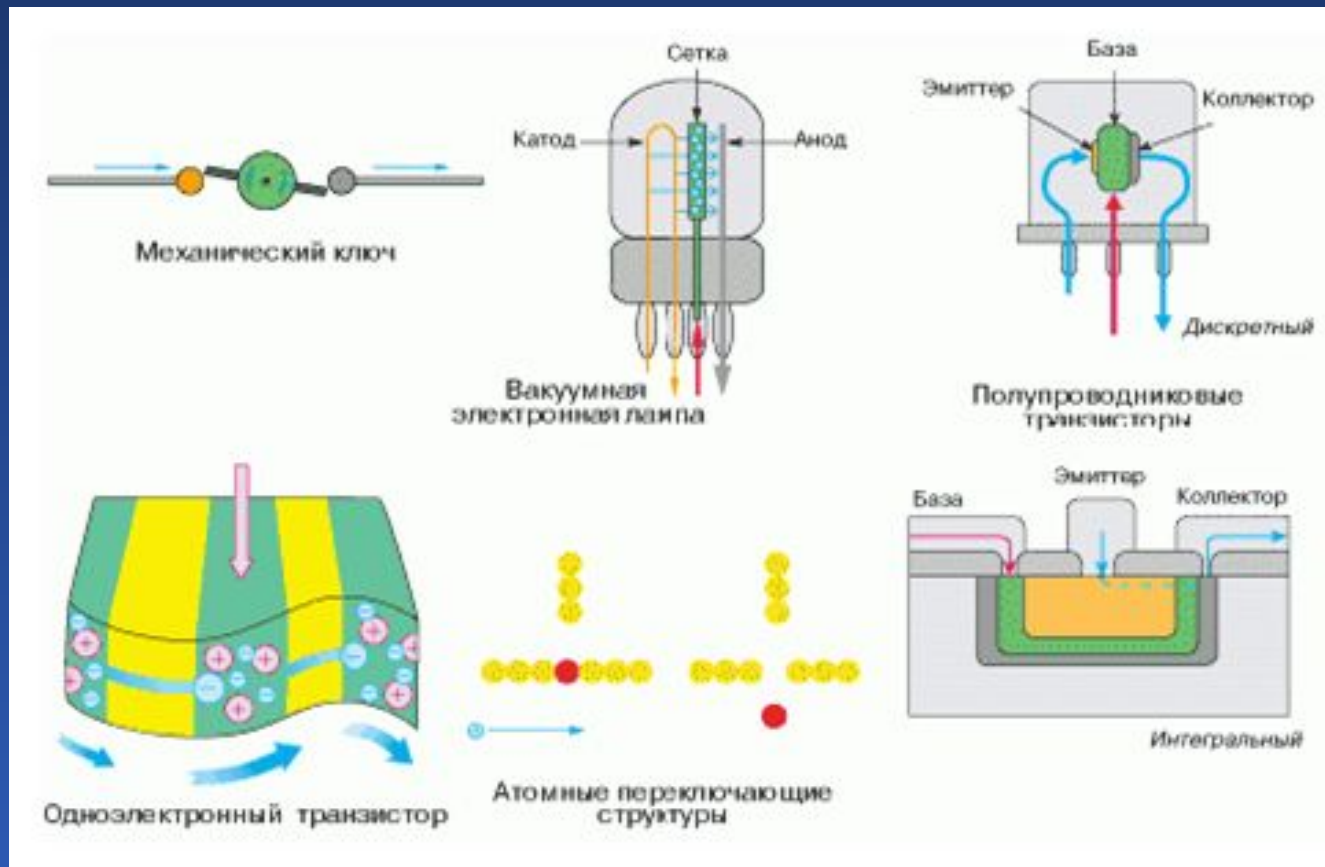
## Тема 9

# Перспективы развития электроники. Наноэлектроника – исторический этап развития электроники

- 9.1. Перспективы развития электроники
- 9.2. Квантовые основы наноэлектроники
- 9.3. Технологические особенности формирования наноструктур и элементы наноэлектроники



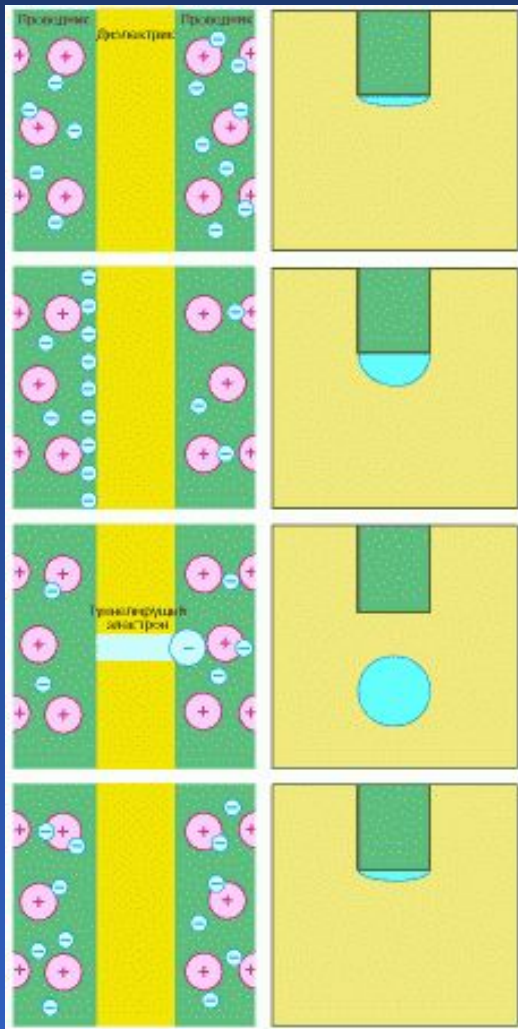
# Перспективы развития электроники



Эволюция элементной базы электроники



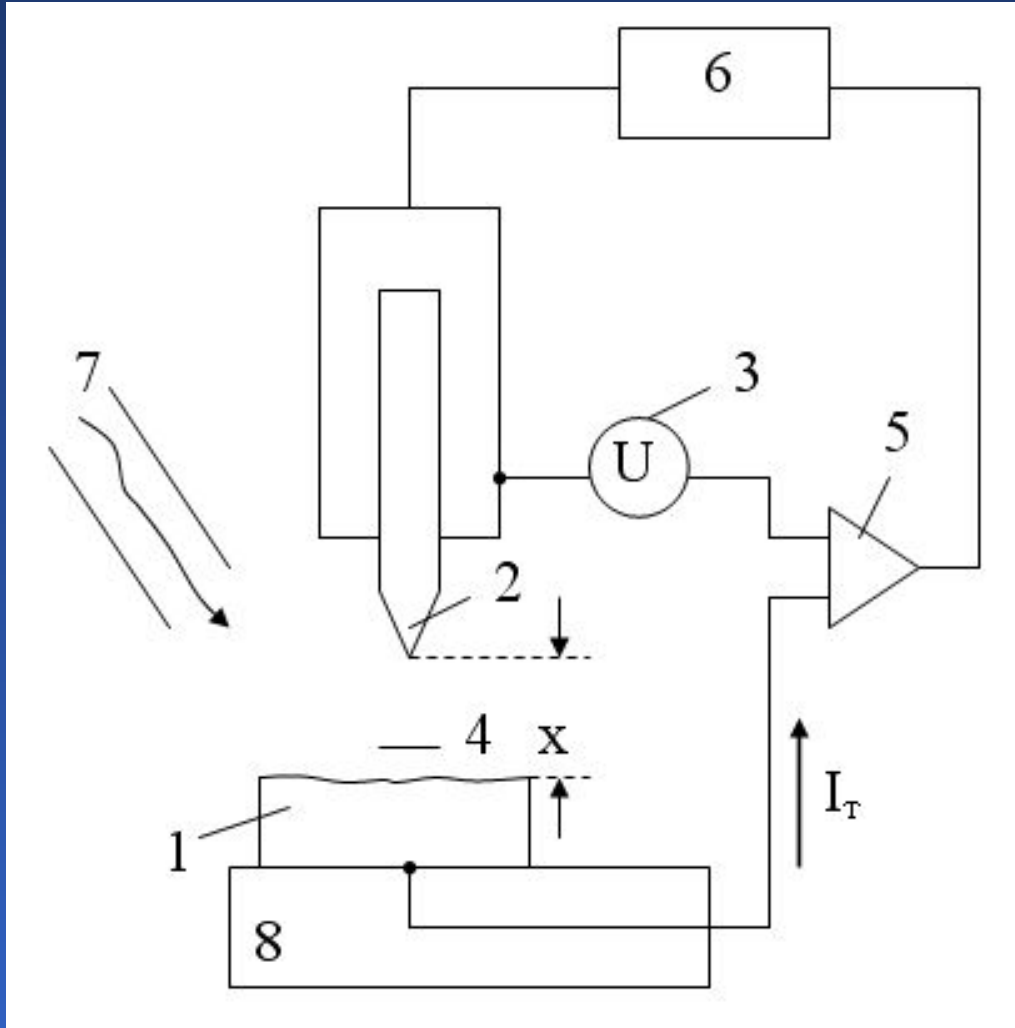
# Квантовые основы наноэлектроники



Одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады



## Технологические особенности формирования наноструктур



Нанотехнологическая установка:  
а – схема нанотехнологической установки на основе туннельного микроскопа; 1 – подложка, 2 – зонд, 3 – источник питания, 4 – зазор между зондом и подложкой, 5 – усилитель туннельного тока, 6 – динамический регулятор зазора на основе пьезоманипуляторов, 7 – приспособление для напуска газообразных и жидких реактивов, 8 – система прецизионного позиционирования подложки



# Применение СТМ для формирования наноразмерных структур

