

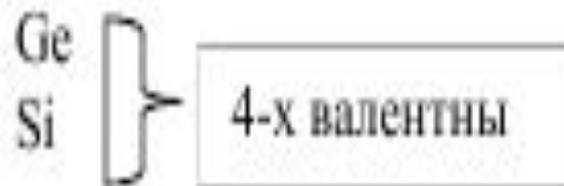
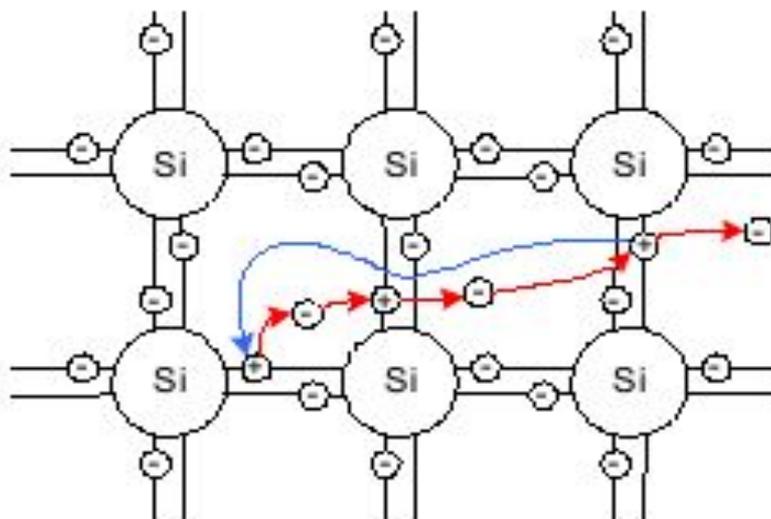
# Полупроводниковые элементы

## Электронно-дырочный переход

Москатов Е.А.

Transend/Электроника лекции для ЗО/WWW/grz.ru

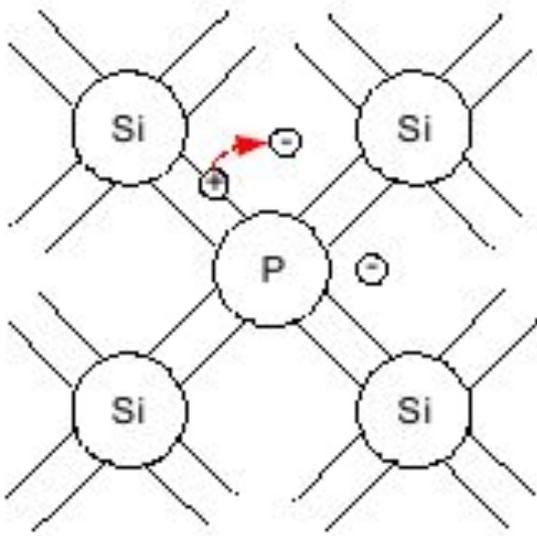
**Собственная проводимость полупроводников.** Собственно полупроводником, или же полупроводником i-типа называется идеально химически чистый полупроводник с однородной кристаллической решёткой.



Кристаллическая структура полупроводника на плоскости может быть определена приведенным образом.

# Электронно-дырочный переход

Москатов Е. А. Электронная техника. – Таганрог, 2004. – 121 стр.



*Если в полупроводник ввести пентавалентную примесь, то 4 валентных электрона восстанавливают ковалентные связи с атомами полупроводника, а пятый электрон остаётся свободным. За счёт этого концентрация свободных электронов будет превышать концентрацию дырок. Примесь, за счёт которой  $n_i > p_i$ , называется донорной примесью. Полупроводник, у которого  $n_i > p_i$ , называется полупроводником с электронным типом проводимости, или полупроводником n-типа. В полупроводнике n-типа электроны называются основными носителями заряда, а дырки – неосновными носителями заряда.*

## Электрические свойства полупроводников

---

Атом фосфора называют *донором*, поскольку он отдает свой лишний электрон.

Электроны в таком полупроводнике являются *основными носителями*, а дырки – *неосновными носителями*. Основные носители имеют отрицательный заряд, поэтому такой материал называется полупроводником *n*-типа.

В качестве донорных примесей для германия и кремния используют фосфор, мышьяк, сурьму.

# Таблица Менделеева

Химическая таблица Д.И. Менделеева											VII		VIII		 Периодический закон открыт Д.И.МЕНДЕЛЕЕВЫМ в 1869 году					
											(H)	He								
1	<b>H</b> 1.00794 ВОДОРОД										2	<b>He</b> 4.002602 ГЕЛИЙ								
2	<b>Li</b> 6.941 ЛИТИЙ	<b>Be</b> 9.012182 БЕРИЛЛИЙ	3	4	<b>B</b> 10.811 БОРО	5	<b>C</b> 12.011 УГЛЕРОД	6	<b>N</b> 14.00674 АЗОТ	7	<b>O</b> 15.9994 КИСЛОРОД	8	<b>F</b> 18.9984032 ФТОР	9	<b>Ne</b> 20.1797 НЕОН					
3	<b>Na</b> 22.989768 НАТРИЙ	<b>Mg</b> 24.3050 МАГНИЙ	11	12	<b>Al</b> 26.981538 АЛЮМИНИЙ	13	<b>Si</b> 28.0855 КРЕМНИЙ	14	<b>P</b> 30.973762 ФОСФОР	15	<b>S</b> 32.066 СЕРА	16	<b>Cl</b> 35.4527 ХЛОР	17	<b>Ar</b> 39.948 АРГОН					
4	<b>K</b> 39.0983 КАЛИЙ	<b>Ca</b> 40.078 КАЛЬЦИЙ	19	20	<b>Sc</b> 44.955810 СВАНДИЙ	21	<b>Ti</b> 47.88 ТИТАН	22	<b>V</b> 50.9415 ВАНАДИЙ	23	<b>Cr</b> 51.9961 ХРОМ	24	<b>Mn</b> 54.93805 МАРГАНЕЦ	25	<b>Fe</b> 55.847 ЖЕЛЕЗО	26	<b>Co</b> 58.93320 КОБАЛЬТ	27	<b>Ni</b> 58.69 НИКЕЛЬ	28
	29	<b>Cu</b> 63.546 МЕДЬ	30	<b>Zn</b> 65.39 ЦИНК	31	<b>Ga</b> 69.723 ГАЛЛИЙ	32	<b>Ge</b> 72.61 ГЕРМАНИЙ	33	<b>As</b> 74.92158 МЫШЬЯК	34	<b>Se</b> 78.96 СЕЛЕН	35	<b>Br</b> 79.904 БРОМ	36	<b>Kr</b> 83.80 КРИПТОН				
5	<b>Rb</b> 85.4678 РУБИДИЙ	<b>Sr</b> 87.62 СТРОНЦИЙ	37	38	<b>Y</b> 88.90585 ИТРИЙ	39	<b>Zr</b> 91.224 ЦИРКОНИЙ	40	<b>Nb</b> 92.90638 НИОБИЙ	41	<b>Mo</b> 95.94 МОЛИБДЕН	42	<b>Tc</b> 97.9072 ТЕХНЕЦИЙ	43	<b>Ru</b> 101.07 РУТЕНИЙ	44	<b>Rh</b> 102.90550 РОДИЙ	45	<b>Pd</b> 106.42 ПАЛЛАДИЙ	46
	47	<b>Ag</b> 107.8682 СЕРЕБРО	48	<b>Cd</b> 112.411 КАДМИЙ	49	<b>In</b> 114.82 ИНДИЙ	50	<b>Sn</b> 118.710 ОЛОВО	51	<b>Sb</b> 121.75 СУРЬМА	52	<b>Te</b> 127.60 ТЕЛЛУР	53	<b>I</b> 126.90447 ИОД	54	<b>Xe</b> 131.29 КСЕНОН				
6	<b>Cs</b> 132.90543 ЦЕЗИЙ	<b>Ba</b> 137.327 БАРИЙ	55	56	<b>La-Lu</b> * ЛАНТАНОИДЫ	71	<b>Hf</b> 178.49 ГАФНИЙ	72	<b>Ta</b> 180.9479 ТАНТАЛ	73	<b>W</b> 183.85 ВОЛЬФРАМ	74	<b>Re</b> 186.207 РЕНИЙ	75	<b>Os</b> 190.2 ОСМИЙ	76	<b>Ir</b> 192.22 ИРИДИЙ	77	<b>Pt</b> 195.08 ПЛАТИНА	78
	79	<b>Au</b> 196.96654 ЗОЛОТО	80	<b>Hg</b> 200.59 РУТУТЬ	81	<b>Tl</b> 204.3833 ТАЛЛИЙ	82	<b>Pb</b> 207.2 СВИНЕЦ	83	<b>Bi</b> 208.98037 ВИСМУТ	84	<b>Po</b> 208.9824 ПОЛОНИЙ	85	<b>At</b> 208.9871 АСТАТ	86	<b>Rn</b> 222.0176 РАДОН				
7	<b>Fr</b> 223.0187 ФРАНЦИЙ	<b>Ra</b> 226.0254 РАДИЙ	87	88	<b>Ac-(Lr)</b> ** АКТИНОИДЫ	103	<b>(Ku)</b> 261.11 (КУРЧАТОВСКИЙ)	104	<b>(Ns)</b> 262.114 (НИЛЬСБОРНИЙ)	105	106	107	108	109						
* ЛАНТАНОИДЫ																				
<b>La</b> 138.9055 ЛАНТАН	<b>Ce</b> 140.125 ЦЕРИЙ	<b>Pr</b> 140.90766 ПРАЗЕОДИМ	<b>Nd</b> 144.24 НЕОДИМ	<b>Pm</b> 144.9127 ПРОМЕТИЙ	<b>Sm</b> 150.36 САМАРИЙ	<b>Eu</b> 151.9645 ЕВРОПИЙ	<b>Gd</b> 157.25 ГАДОЛИНИЙ	<b>Tb</b> 158.92504 ТЕРБИЙ	<b>Dy</b> 162.50 ДИСПРОЗИЙ	<b>Ho</b> 164.93032 ГОЛЬМИЙ	<b>Er</b> 167.26 ЕРБИЙ	<b>Tm</b> 168.93421 ТУЛЬМИЙ	<b>Yb</b> 173.04 ИТТЕРБИЙ	<b>Lu</b> 174.967 ЛЮТИЦИЙ						
** АКТИНОИДЫ																				

**Li** 3  
 6.941  
 ЛИТИЙ

1 - Атомный номер  
 2 - Относительная атомная масса

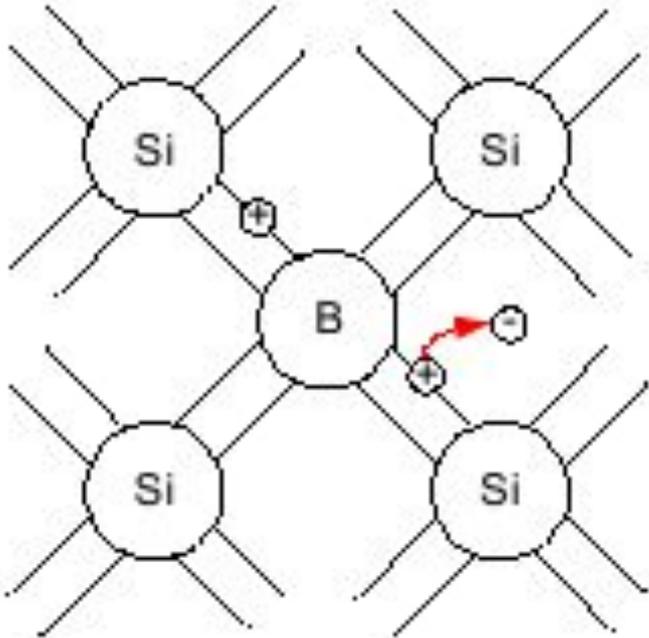
Относительные атомные массы приведены по Международной таблице 1988 года

■ - I период  
 ■ - II период  
 ■ - III период  
 ■ - IV период

# Электронно-дырочный

## переход

При введении трёхвалентной примеси три её валентных электрона восстанавливают ковалентную связь с атомами полупроводника, а четвёртая ковалентная связь оказывается не восстановленной, т. е. имеет место дырка. В результате этого концентрация дырок будет больше концентрации электронов.



Примесь, при которой  $p_i > n_i$ , называется акцепторной примесью. Полупроводник, у которого  $p_i > n_i$ , называется полупроводником с дырочным типом проводимости, или полупроводником p-типа. В полупроводнике p-типа дырки называются основными носителями заряда, а электроны – неосновными носителями заряда.

# Электрические свойства полупроводников

---

**Атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные дырки, то есть вызывают недостаток электронов называются акцепторами.**

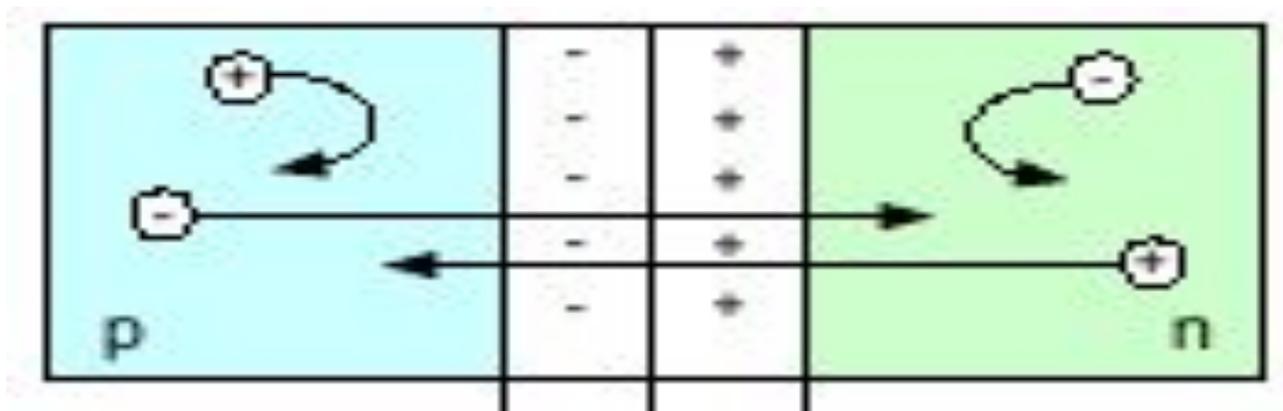
**В качестве акцепторных примесей в германии и кремнии используют бор, алюминий, галлий, индий, то есть элементы из третьего столбца таблицы Менделеева.**

## Электронно-дырочный (p-n) переход

**Образование электронно-дырочного перехода Прямое и обратное включение p-n перехода Свойства p-n перехода**

При сплавлении полупроводников различных типов на стыке создается область, которая называется электронно-дырочным переходом или p-n переходом. Марченко

Ширина p-n перехода – десятые доли микрона.



# Распределение потенциала в $p$ - $n$ переходе Джонс

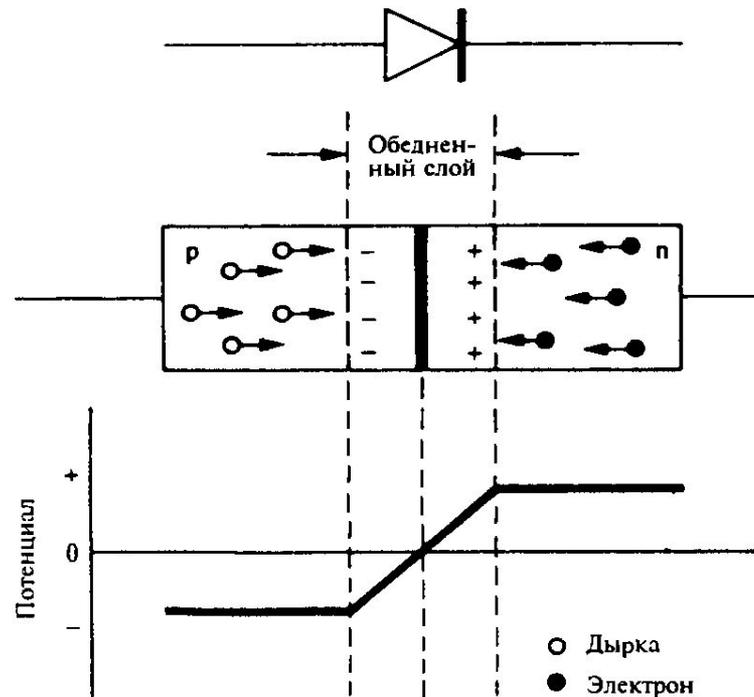
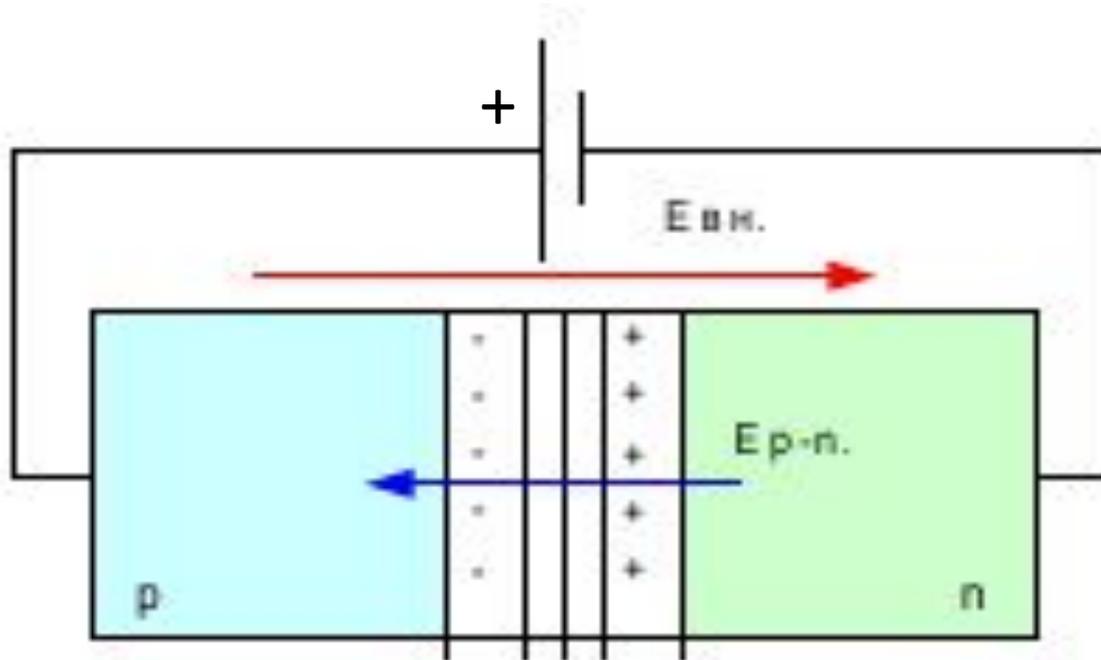


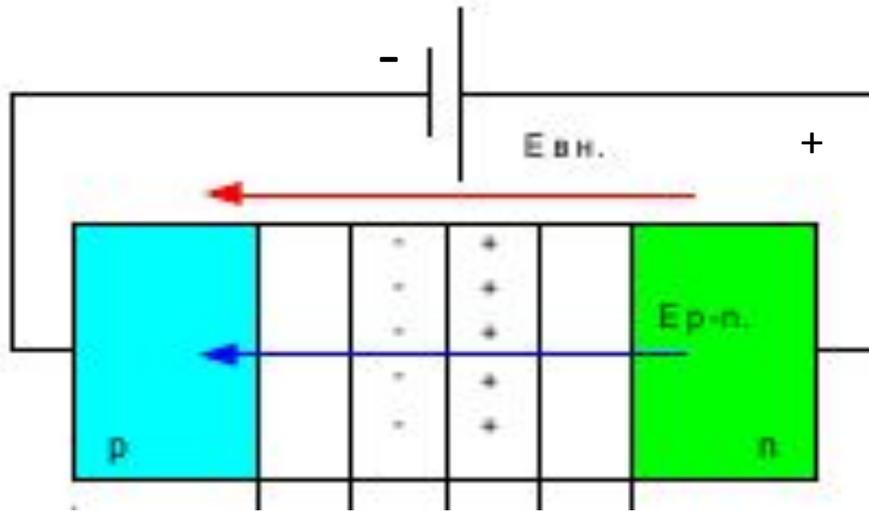
Рис. 1.9. Условное обозначение полупроводникового диода,  $p$ - $n$  переход с обедненным слоем и изменение потенциала.

# Прямое включение



Такое включение p-n перехода называется прямым, и ток через p-n переход, вызванный основными носителями заряда, также называется прямым током.

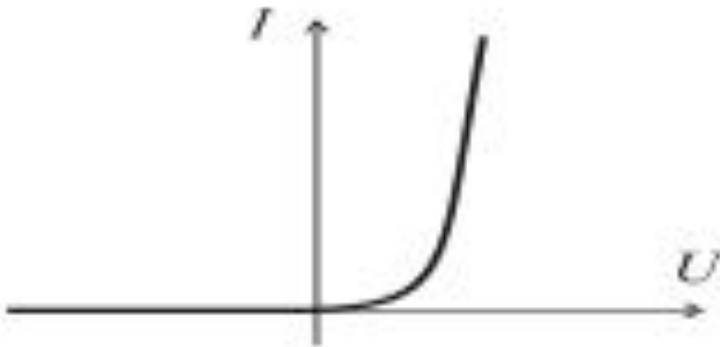
# Обратное включение



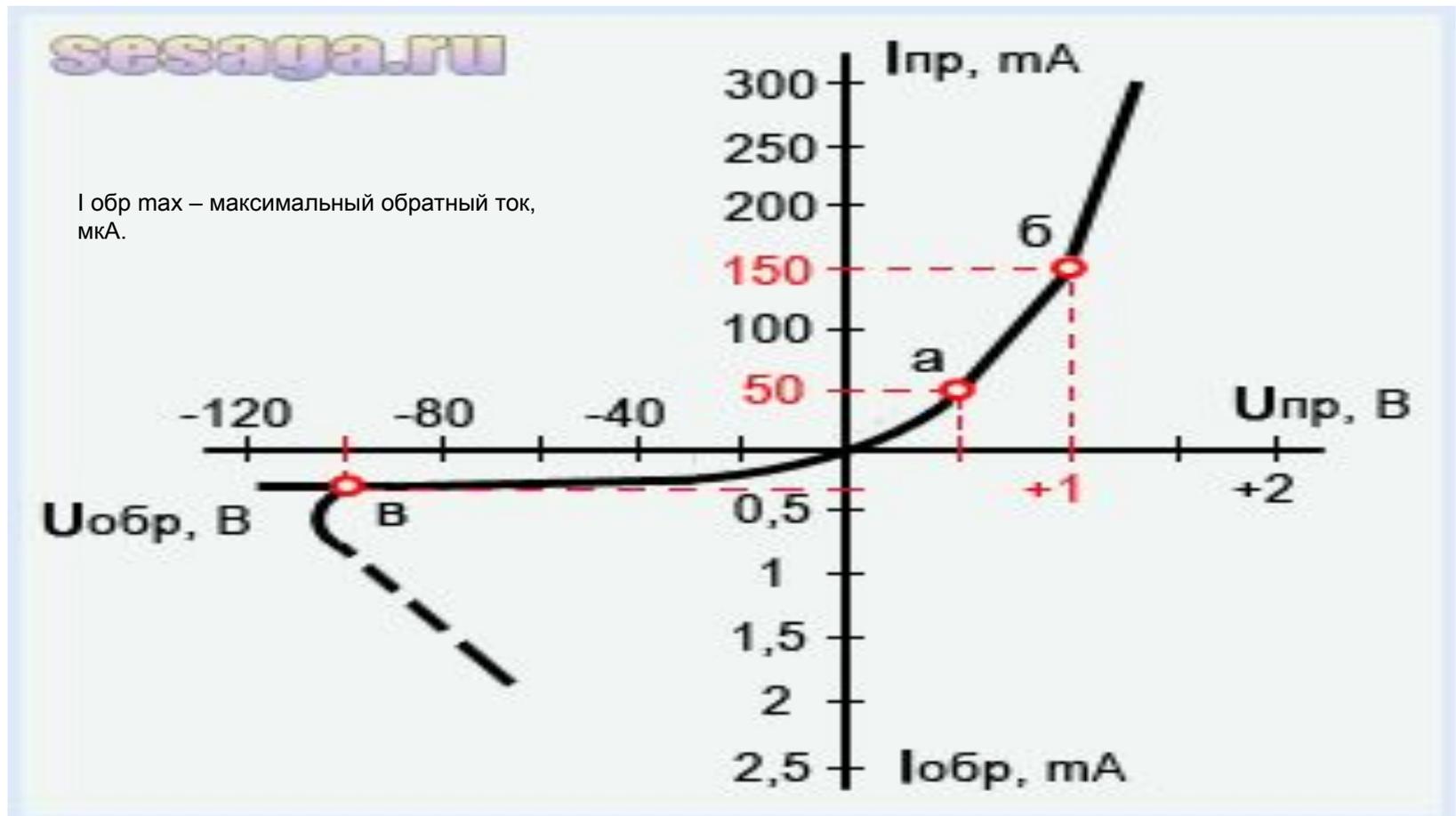
Если подключить внешнее напряжение минусом на p-область, а плюсом на n-область, то возникает внешнее электрическое поле, линии напряжённости которого совпадают с внутренним полем p-n перехода. В результате это приведёт к увеличению потенциального барьера и ширины p-n перехода. Основные носители заряда не смогут преодолеть p-n переход, и считается, что p-n переход закрыт. Оба поля – и внутреннее и внешнее - являются ускоряющими для неосновных носителей заряда, поэтому неосновные носители заряда будут проходить через p-n переход, образуя очень маленький ток, который называется обратным током. Такое включение p-n перехода также

# Свойства р-n перехода

- К основным свойствам р-n перехода относятся:
- свойство односторонней проводимости;
- температурные свойства р-n перехода;
- частотные свойства р-n перехода;
- пробой р-n перехода.



# Свойства р-п перехода



$I_{обр\ max}$  – максимальный обратный ток, мА.

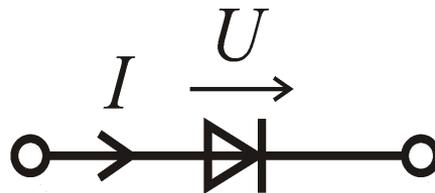
$U_{обр\ max}$  – максимальное постоянное обратное напряжение, В;

# Полупроводниковые диоды

---

Область с высокой концентрацией примеси называют *эмиттером*. Функции эмиттера может выполнять как катод, так и анод. Область с низкой концентрацией примесей называют *базой*. База имеет значительно большее объемное сопротивление, чем эмиттер.

Условное графическое обозначение диода



# Полупроводниковые диоды

---

Ток  $I_0$  называют *тепловым, или обратным, током насыщения*. Величина этого тока зависит от материала, площади  $p$ - $n$ -перехода и от температуры.

Типичные значения  $I_0$  : от  $10^{-12}$  до  $10^{-16}$  А. Обратный ток диода зависит от температуры. У кремниевых диодов он удваивается при увеличении температуры приблизительно на  $7^\circ\text{C}$ . На практике считают, что обратный ток кремниевых диодов увеличивается в 2,5 раза при увеличении температуры на каждые  $10^\circ\text{C}$ .

# Диоды и их свойства Марченко

- Полупроводниковым диодом называют прибор с одним р-п переходом, имеющим два вывода: анод А и катод К (рис. 1.3).

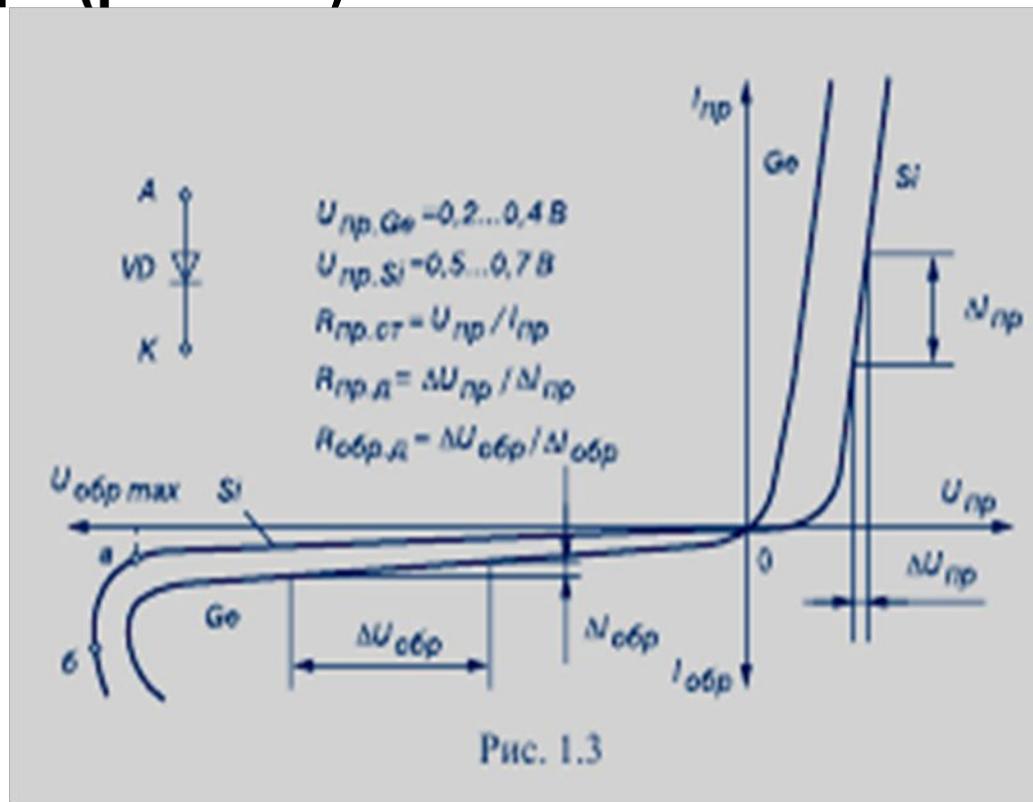


Рис. 1.3

# **Устройство, классификация и основные параметры полупроводниковых диодов**

- **Классификация диодов производится по следующим признакам:**
- **1] По конструкции: плоскостные диоды; точечные диоды; микросплавные диоды.**
- **2] По мощности: маломощные; средней мощности; мощные.**
- **3] По частоте: низкочастотные; высокочастотные; СВЧ.**
- **4] По функциональному назначению:**
- **выпрямительные диоды;**
- **импульсные диоды;**
- **стабилитроны;**
- **варикапы;**
- **светодиоды;**
- **тоннельные диоды**
- **и так далее.**

# Маркировка

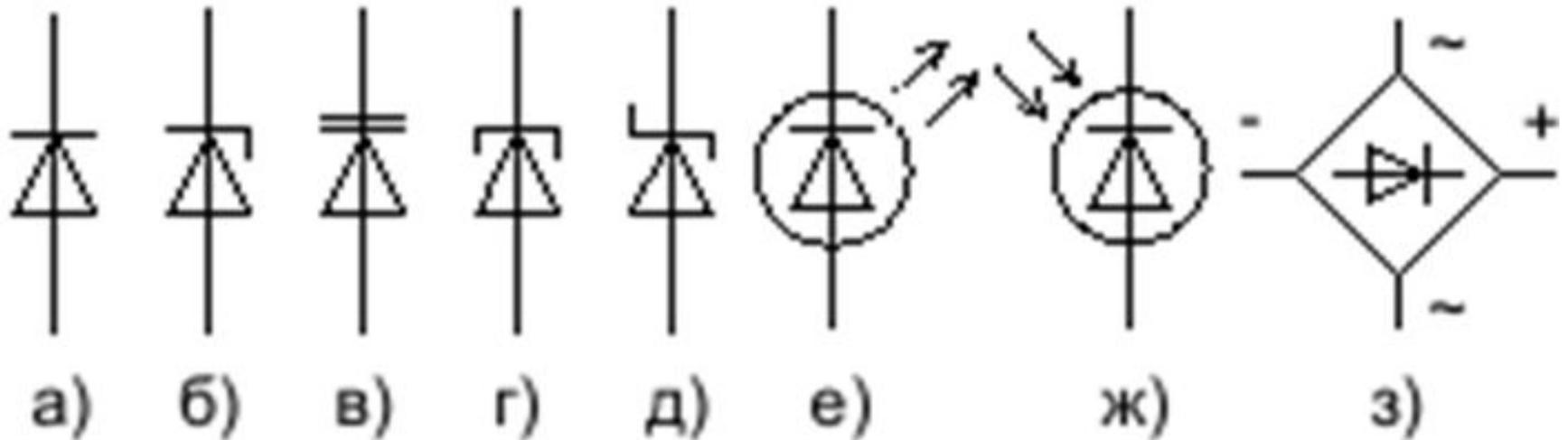
- Новый ГОСТ на маркировку диодов состоит из 4 обозначений:
- К С -156 А
- Г Д -507 Б
- I II III IV
- Рис. 26



- **I – показывает материал полупроводника:**
- Г (1) – германий; К (2) – кремний; А (3) – арсенид галлия.
- **II – тип полупроводникового диода:**
- Д – выпрямительные, ВЧ и импульсные диоды; А – диоды СВЧ; С – стабилитроны; В – варикапы; И – туннельные диоды; Ф – фотодиоды; Л – светодиоды; Ц – выпрямительные столбы и блоки.
- **III – три цифры – группа диодов по своим электрическим параметрам:**
- 101-399 выпрямительные; 401-499 ВЧ диоды; 501-599 импульсные
- **IV – модификация диодов в данной (третьей) группе.**

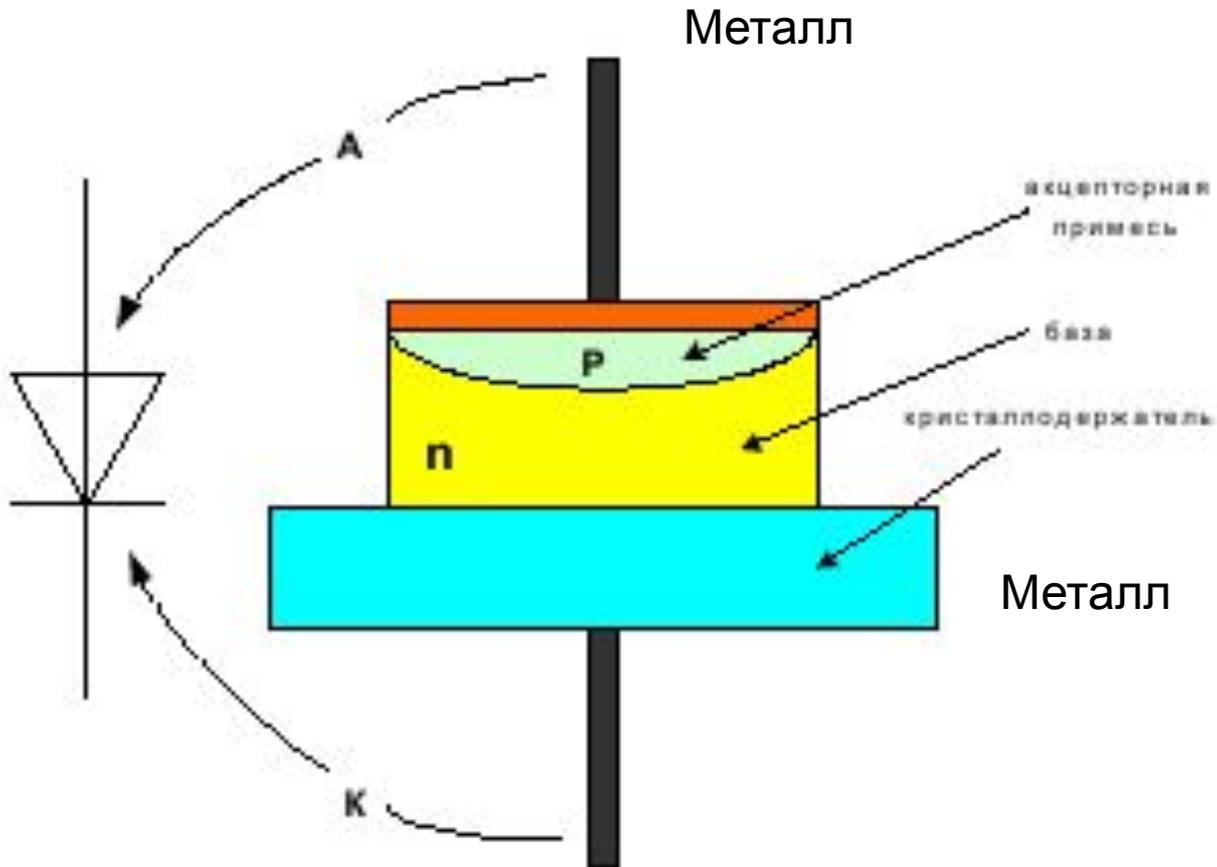
# Условно-графическое обозначение

УГО:

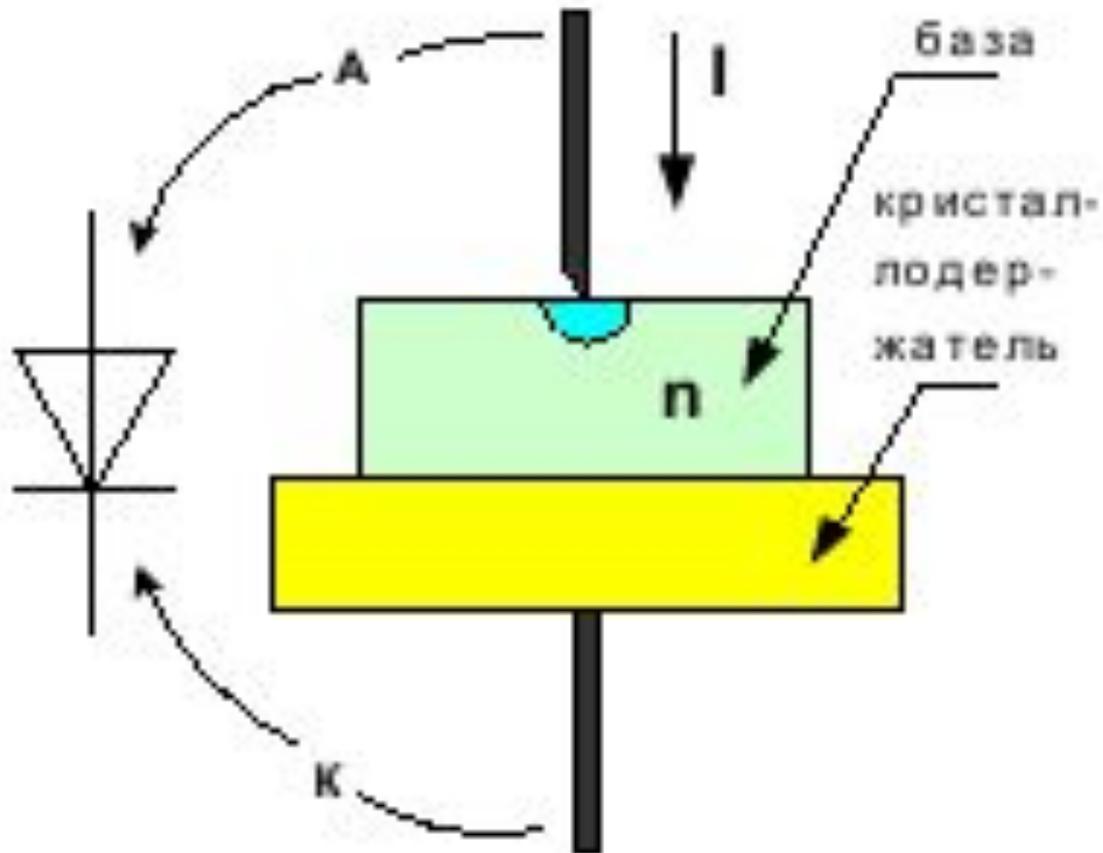


а) Так обозначают выпрямительные, высокочастотные, СВЧ, импульсные и диоды Гана; б) стабилитроны; в) варикапы; г) тоннельные диоды; д) диоды Шоттки; е) светодиоды; ж) фотодиоды; з) выпрямительные блоки

# Устройство плоскостных диодов



# Устройство точечных диодов



## Основные параметры полупроводниковых диодов

Максимально допустимый прямой ток  $I_{пр.мах}$ .

Прямое падение напряжения на диоде при максимальном прямом токе  $U_{пр.мах}$ .

Максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр.мах} = (2/3 \div 3/4) \cdot U_{эл.проб.}$

Обратный ток при максимально допустимом обратном напряжении  $I_{обр.мах}$ .

Прямое и обратное статическое сопротивление диода при заданных прямом и обратном

напряжениях:  $R_{ст.пр} = \frac{U_{пр.}}{I_{пр.}}$ ;  $R_{ст.обр} = \frac{U_{обр.}}{I_{обр.}}$ .

# **Выпрямительный диод: определение**

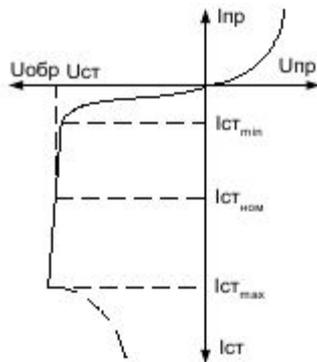
**Выпрямительным диодом называется полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный в силовых цепях, то есть в источниках питания.**

**Выпрямительные диоды всегда плоскостные, они могут быть германиевые или кремниевые.**

**Германиевые диоды лучше кремниевых тем, что имеют меньшее прямое падение напряжения.**

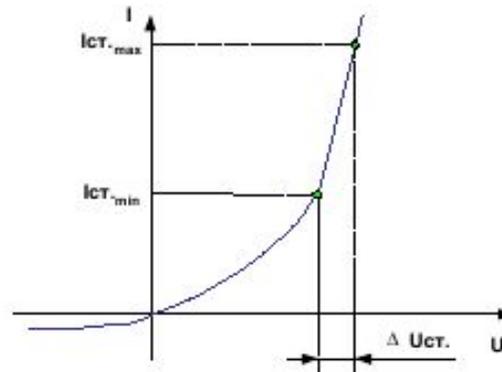
**Кремниевые диоды превосходят германиевые по диапазону рабочих температур, по максимально допустимому обратному напряжению, а также имеют меньший обратный ток.**

# Стабилитроны, варикапы, светодиоды и фотодиоды



Стабилитроном называется полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации уровня постоянного напряжения.

Стабилиторы – для стабилизации напряжения менее 3В, и у них используется прямая ветвь ВАХ (смотрите рисунок 44).

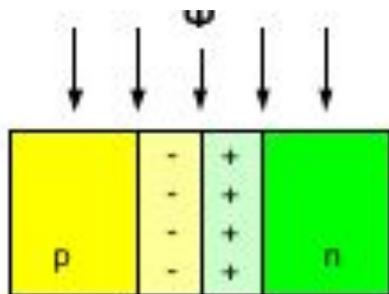


# Варикапы

**Варикапом называется полупроводниковый диод, у которого в качестве основного параметра используется барьерная ёмкость, величина которой варьируется при изменении обратного напряжения. Следовательно, варикап применяется как конденсатор переменной ёмкости, управляемый напряжением.**

# Фотодиоды

Фотодиодом называется фотогальванический приёмник излучения, светочувствительный элемент которого представляют собой структуру полупроводникового диода без внутреннего усиления. При облучении полупроводника световым потоком  $\Phi$  возрастает фотогенерация собственных носителей зарядов (смотрите рисунок 47), что приводит к увеличению количества как основных, так и неосновных носителей зарядов.



# Светодиоды

**Светодиодом называется полупроводниковый прибор, в котором происходит непосредственное преобразование электрической энергии в энергию светового излучения.**

**Принцип действия. При прямом включении основные носители заряда переходят через p-n переход и там рекомбинируют. Рекомбинация связана с выделением энергии. Для**

**большинства полупроводниковых материалов это энергия тепловая. Только для некоторых типов на основе арсенида галлия ширина запрещённой зоны  $\Delta W$  достаточно велика, и длина волны лежит в видимой части спектра.**

**Туннельные диоды, диоды Шоттки**  
**Импульсные, высокочастотные (ВЧ) и**  
**сверхвысокочастотные (СВЧ) диоды**  
Импульсные, высокочастотные (ВЧ) и  
сверхвысокочастотные (СВЧ) диоды  
предназначены для работы в  
импульсных цепях.

В диодах Шоттки используется переход  
металл-полупроводник.

Туннельные диоды: ВАХ имеют  
отрицательное дифференциальное  
сопротивление

# Транзисторы

## Биполярные транзисторы

- Классификация и маркировка транзисторов. **Транзистором называется полупроводниковый преобразовательный прибор, имеющий не менее трёх выводов и способный усиливать мощность.**
- Классификация транзисторов производится по следующим признакам:
- По материалу полупроводника – обычно германиевые или кремниевые;
- По типу проводимости областей: с прямой проводимостью (р-п-р - структура) или с обратной проводимостью (п-р-п - структура);
- По принципу действия транзисторы подразделяются на биполярные и полевые (униполярные);
- По частотным свойствам;
- По мощности. Маломощные транзисторы ММ (<0,3 Вт), средней мощности СрМ (0,3-3 Вт), М мощные (>3 Вт).

# Маркировка транзисторов

Маркировка.

Г	Т	-	313	А
К	П	-	103	П
I	II	-	III	IV

Рис. 59

I – материал полупроводника: Г – германий, К – кремний.

II – тип транзистора по принципу действия: Т – биполярные, П – полевые.

III – три или четыре цифры – группа транзисторов по электрическим параметрам. Первая цифра показывает частотные свойства и мощность транзистора в соответствии с ниже приведённой таблицей.

Таблица 1

<b>P \ f</b>	<b>&lt;3 МГц НЧ</b>	<b>3 – 30 МГц СрЧ</b>	<b>&gt;30 МГц ВЧ и СВЧ</b>
<b>ММ &lt;0,3 Вт</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>СрМ 0,3÷3 Вт</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>М &gt;3 Вт</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>

IV – модификация транзистора в 3-й группе.

# Устройство биполярных транзисторов

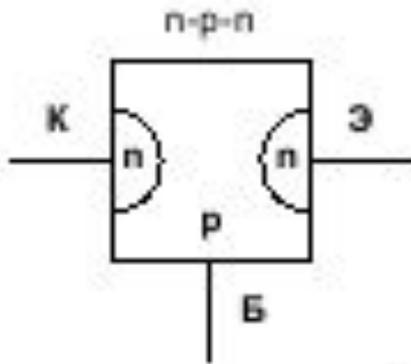


Рис. 60

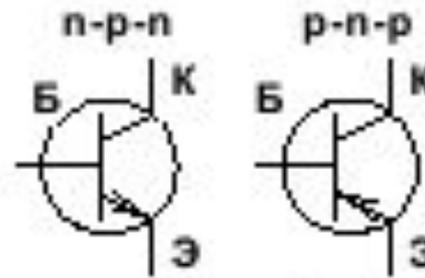
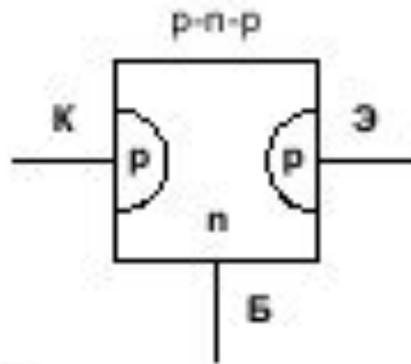


Рис. 61

Область, имеющая большую площадь p-n перехода, и вывод от неё называют коллектором.

Область, имеющая меньшую площадь p-n перехода, и вывод от неё называют эмиттером.

P-n переход между коллектором и базой называют коллекторным переходом, а между эмиттером и базой – эмиттерным переходом.

# Устройство биполярных транзисторов

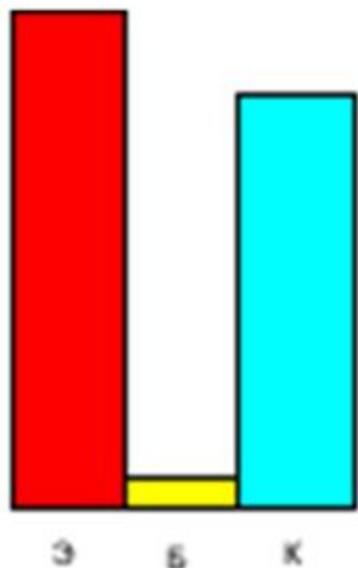


Рис. 62

Направление стрелки в транзисторе показывает направление протекающего тока. Основной особенностью устройства биполярных транзисторов является неравномерность концентрации основных носителей зарядов в эмиттере, базе и коллекторе. В эмиттере концентрация носителей заряда максимальная. В коллекторе – несколько меньше, чем в эмиттере. В базе – во много раз меньше, чем в эмиттере и коллекторе (рисунок 62).

# Принцип действия биполярных транзисторов.

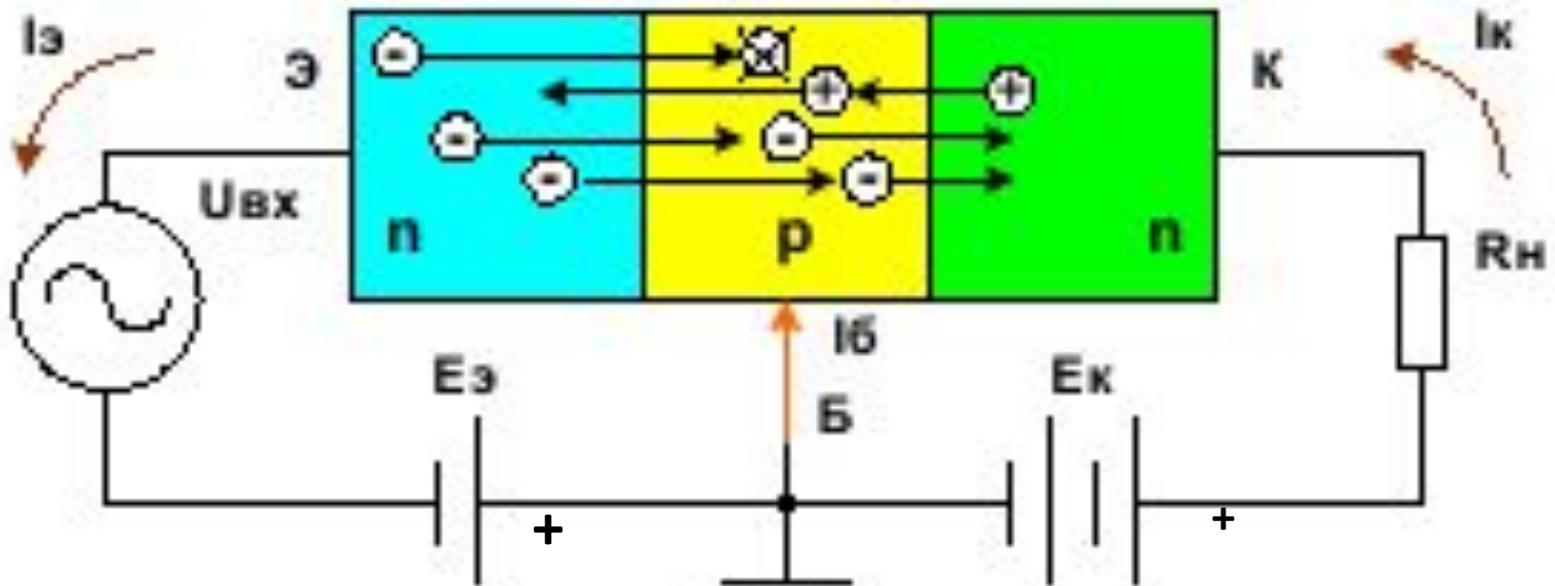


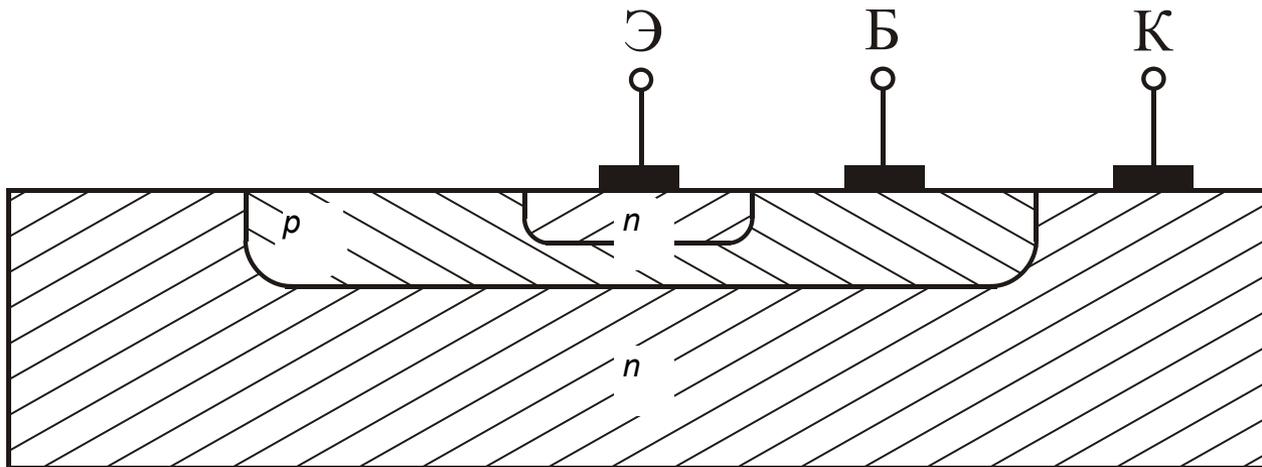
Рис. 63

Так как эмиттерный переход открыт, то через него будет протекать ток эмиттера, вызванный переходом электронов из эмиттера в базу и переходом дырок из базы в эмиттер. Следовательно, ток эмиттера будет иметь две составляющие – электронную и дырочную.

# Биполярные транзисторы

---

## *Структура биполярного транзистора*



# Биполярные транзисторы

---

*Активный режим работы биполярного транзистора*

$$I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}}$$

$\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера.

У интегральных транзисторов  $\alpha = 0.99\text{--}0.995$

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

# Биполярные транзисторы

---

*Режим отсечки:*

$$I_{\varepsilon} = I_{\delta} = 0$$

$$U_{\delta\varepsilon} < 0 \text{ В}$$

*Режим насыщения:*

$$U_{\text{кэ}} < 0.4 \text{ В}$$

# Принцип действия биполярных транзисторов.

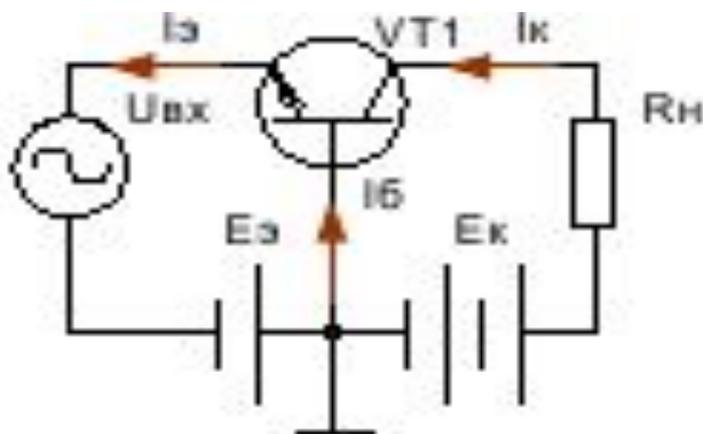


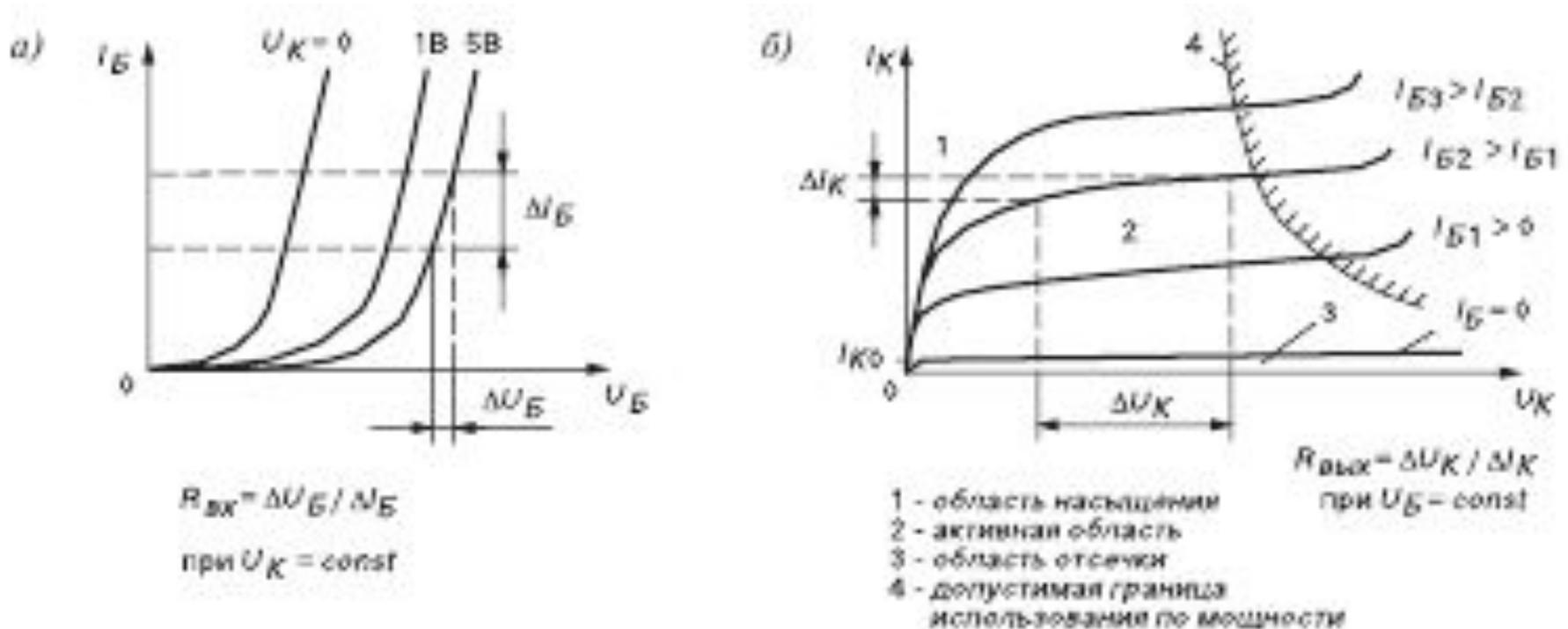
Рис. 64

$$I_{вх} = I_э$$
$$I_{вых} = I_к$$

Из трёх выводов транзистора на один подаётся входной сигнал, со второго – снимается выходной сигнал, а третий вывод является общим для входной и выходной цепи. Таким образом, рассмотренная выше схема получила название схемы с общей базой.

# Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов Марченко

- Транзистор может работать на постоянном токе, малом переменном сигнале, большом переменном сигнале и в ключевом (импульсном) режиме.



Для схемы с ОЭ

Рис. 1.15

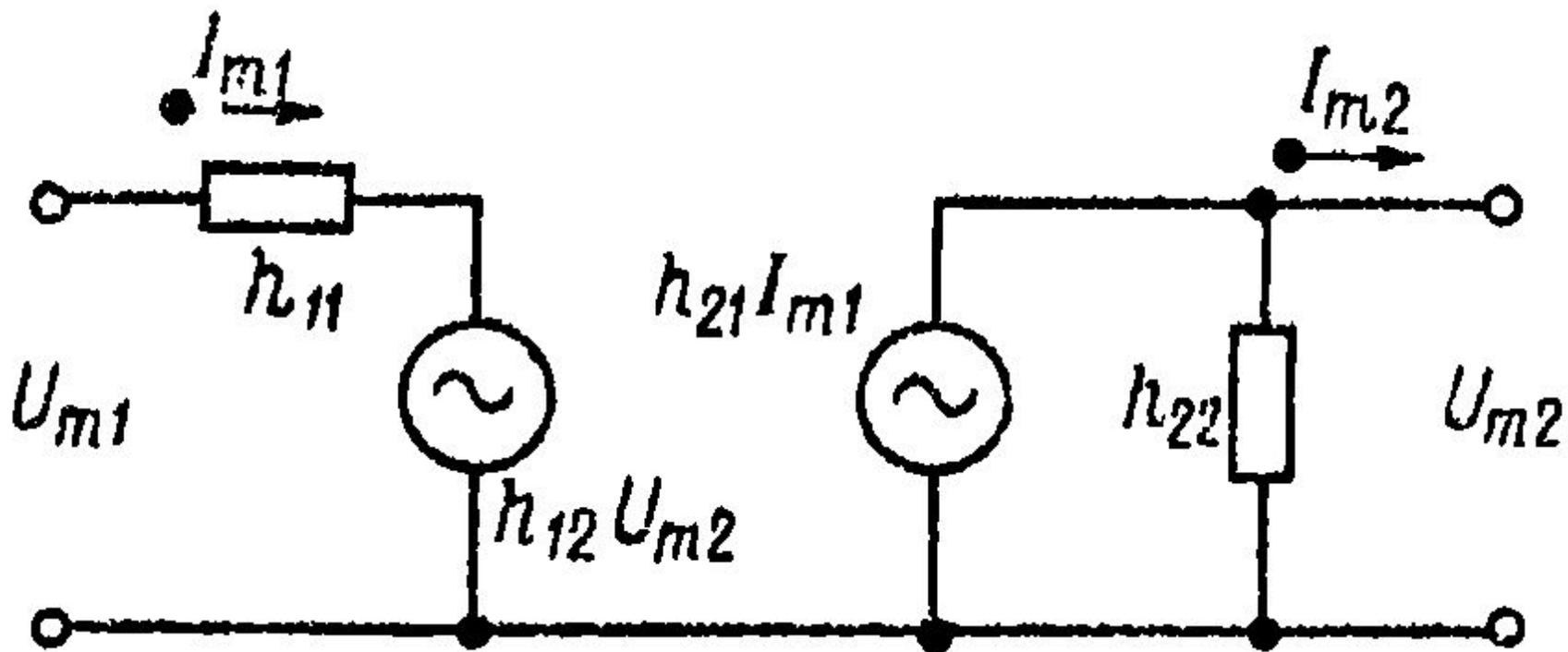
# Характеристики транзисторов

- Для сравнительного анализа транзисторов и аналитического расчета электронных схем, в которых они применяются, придумано и используется значительное количество параметров.
- В настоящее время основными считаются *смешанные* (или *гибридные*) параметры, обозначаемые буквой *h* или *H* (*Жеребцов*).
- Это параметры низкой частоты и малого сигнала. Транзистор представляется в виде линейного четырехполюсника (рис. 1.17)
- (состоящего из резистивных элементов и управляемого источника тока), описываемого системой из двух уравнений:

$$U_{m1} = h_{11}I_{m1} + h_{12}U_{m2};$$

$$I_{m2} = h_{21}I_{m1} + h_{22}U_{m2}.$$

# Эквивалентная схема транзистора



# Параметры транзисторов, выраженные через амплитуды переменных составляющих токов и напряжений

- **Входное сопротивление:**  $h_{11} = U_{m1}/I_{m1}$  при  $U_{m2} = 0$

- **Коэффициент обратной связи по напряжению:**

$$h_{12} = U_{m1}/U_{m2} \text{ при } I_{m1} = 0;$$

- **Коэффициент усиления по току  
(коэффициент передачи тока):**

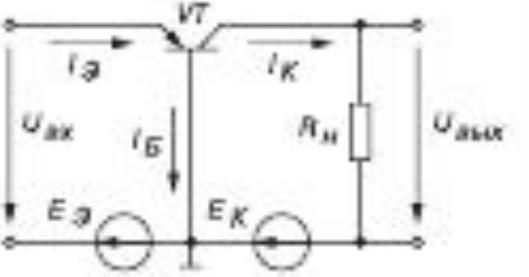
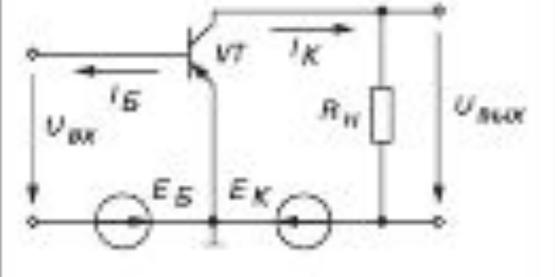
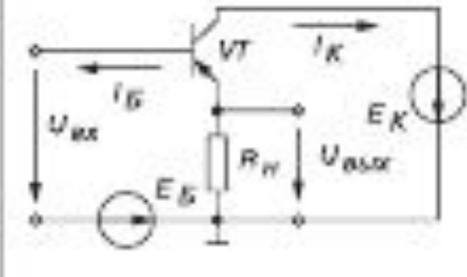
$$h_{21} = I_{m2}/I_{m1} \text{ при } U_{m2} = 0;$$

*Выходная проводимость*

$$h_{22} = I_{m2}/U_{m2} \text{ при } I_{m1} = 0.$$

# Схемы включения биполярных транзисторов

Марченко

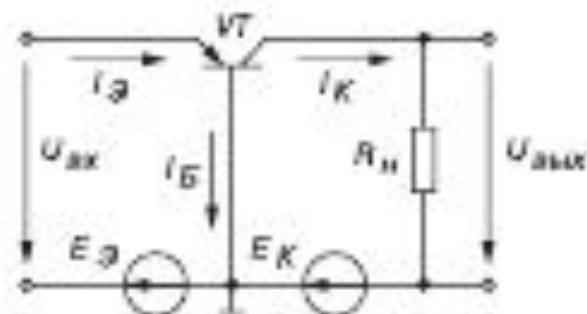
Схема с ОБ	Схема с ОЭ	Схема с ОК
		
$R_{свт} = R_э + R_б(1 - \alpha)$ <p style="text-align: center;">(5...100 Ом)</p> $h_{21б} = \alpha \approx 1$ $K_{vб}^* \approx \frac{R_н}{R_эб}$ <p style="text-align: center;">(до 1000)</p> $K_{pб}^* \approx \frac{R_н}{R_эб}$ <p style="text-align: center;">(до 1000)</p> $R_{свт} \approx 0,1...1 \text{ МОм}$	$R_{свт} = R_б + R_э(\beta + 1)$ <p style="text-align: center;">(100...1000 Ом)</p> $h_{21э} = \beta = -\alpha / (1 - \alpha)$ <p style="text-align: center;">(10...200)</p> $K_{vэ}^* = \frac{-\beta R_н}{R_бэ}$ <p style="text-align: center;">(10...1000)</p> $K_{pэ}^* = \frac{\beta^2 R_н}{R_бэ}$ <p style="text-align: center;">(до 10000)</p> $R_{свт} = 10...100 \text{ кОм}$	$R_{свт} \approx R_б +$ $+ (R_э + R_н)(\beta + 1)$ <p style="text-align: center;">(30...100 кОм)</p> $h_{21к} \approx \beta + 1$ <p style="text-align: center;">(10...100)</p> $K_{vк} \approx 1$ $K_{pк} \approx \beta$ <p style="text-align: center;">(10...200)</p> $R_{свт} \approx 10...100 \text{ Ом}$

$K_{vб}^*$  и  $K_{pб}^*$  — коэффициенты усиления по напряжению и по мощности транзистора

Схема с ОБ

Схема с ОЭ

Схема с ОК



$$R_{\text{вх}} = R_{\text{Э}} + R_{\text{Б}}(1 - \alpha)$$

(5...100 Ом)

$$h_{21\text{Б}} = \alpha \approx 1$$

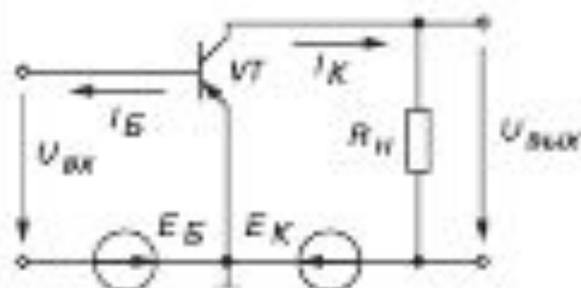
$$K_{\text{вБ}}^* \approx \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ЭБ}}}$$

(до 1000)

$$K_{\text{рБ}}^* \approx \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ЭБ}}}$$

(до 1000)

$$R_{\text{вых}} \approx 0,1...1 \text{ МОм}$$



$$R_{\text{вх}} = R_{\text{Б}} + R_{\text{Э}}(\beta + 1)$$

(100...1000 Ом)

$$h_{21\text{Э}} = \beta = -\alpha / (1 - \alpha)$$

(10...200)

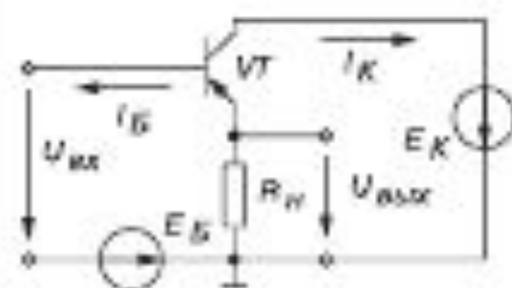
$$K_{\text{вЭ}} = \frac{-\beta R_{\text{Н}}}{R_{\text{БЭ}}}$$

(10...1000)

$$K_{\text{рЭ}} = \frac{\beta^2 R_{\text{Н}}}{R_{\text{БЭ}}}$$

(до 10000)

$$R_{\text{вых}} = 10...100 \text{ кОм}$$



$$R_{\text{вх}} \approx R_{\text{Б}} +$$

$$+ (R_{\text{Э}} + R_{\text{Н}})(\beta + 1)$$

(30...100 кОм)

$$h_{21\text{К}} \approx \beta + 1$$

(10...100)

$$K_{\text{вК}} \approx 1$$

$$K_{\text{рК}} \approx \beta$$

(10...200)

$$R_{\text{вых}} \approx 10...100 \text{ Ом}$$

$K_{\text{вБ}}^*$  и  $K_{\text{рБ}}^*$  — коэффициенты усиления по напряжению и по мощности транзистора

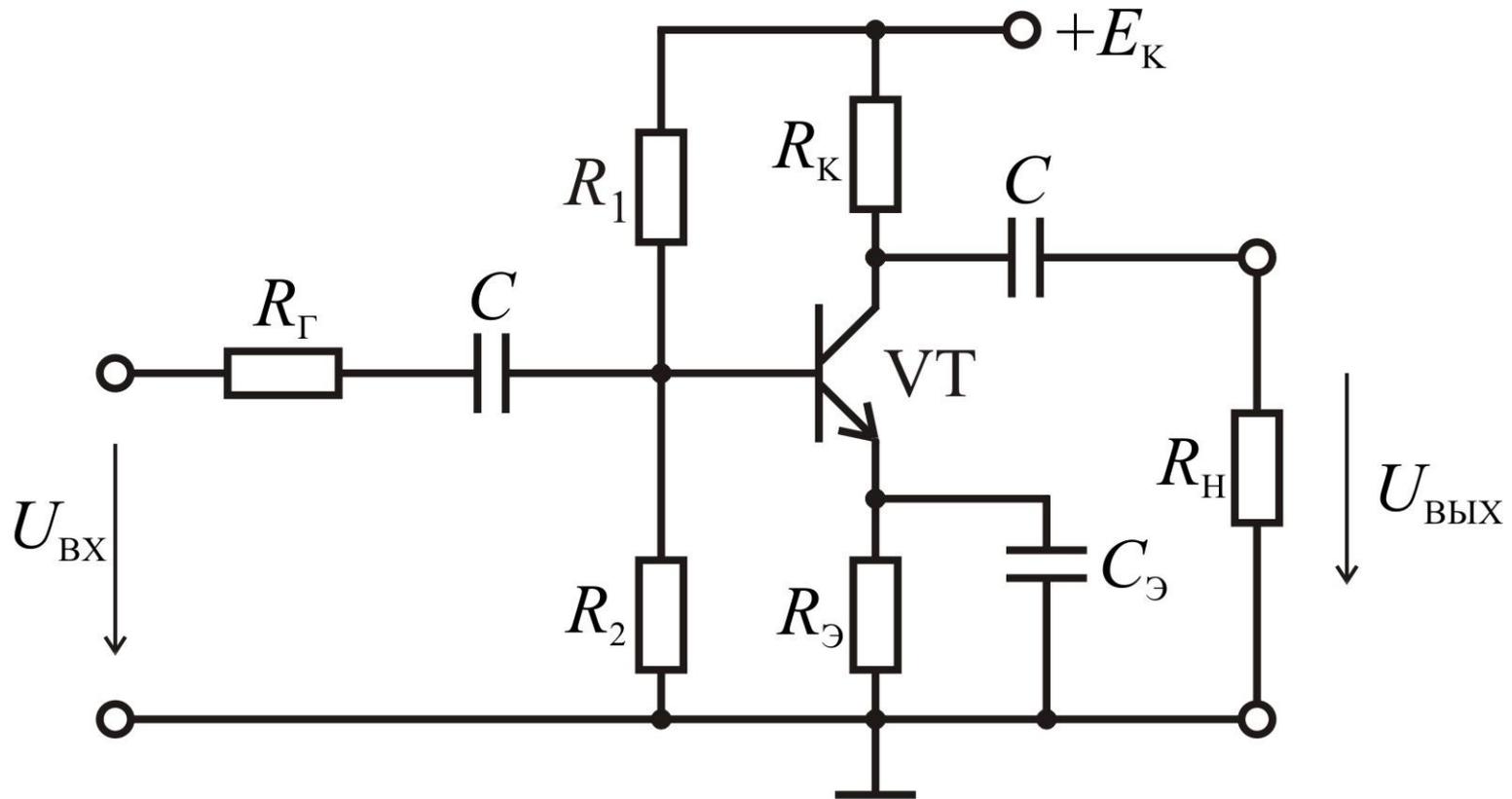
Таблица 4.1. Важнейшие параметры основных схем включения транзисторов

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
$k_I$	Десятки — сотни	Немного меньше единицы	Десятки — сотни
$k_U$	Десятки — сотни	Десятки — сотни	Немного меньше единицы
$k_P$	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 между $U_{вых}$ и $U_{вх}$	180°	0	0

# Усилительные свойства биполярного транзистора..

- **Усилительные свойства биполярного транзистора. Независимо от схемы включения,**
- **транзистор характеризуется тремя коэффициентами усиления:**
- **$K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$  – по току;**
- **$K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = (I_{\text{ВЫХ}} \cdot R_H) / (I_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{ВХ}}) = K_I \cdot R_H / R_{\text{ВХ}}$  – по напряжению;**
- **$K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = (U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_{\text{ВЫХ}}) / (U_{\text{ВХ}} \cdot I_{\text{ВХ}}) = K_I \cdot K_U$  – по мощности.**

# Усилительный каскад на биполярном транзисторе



# Усилительный режим

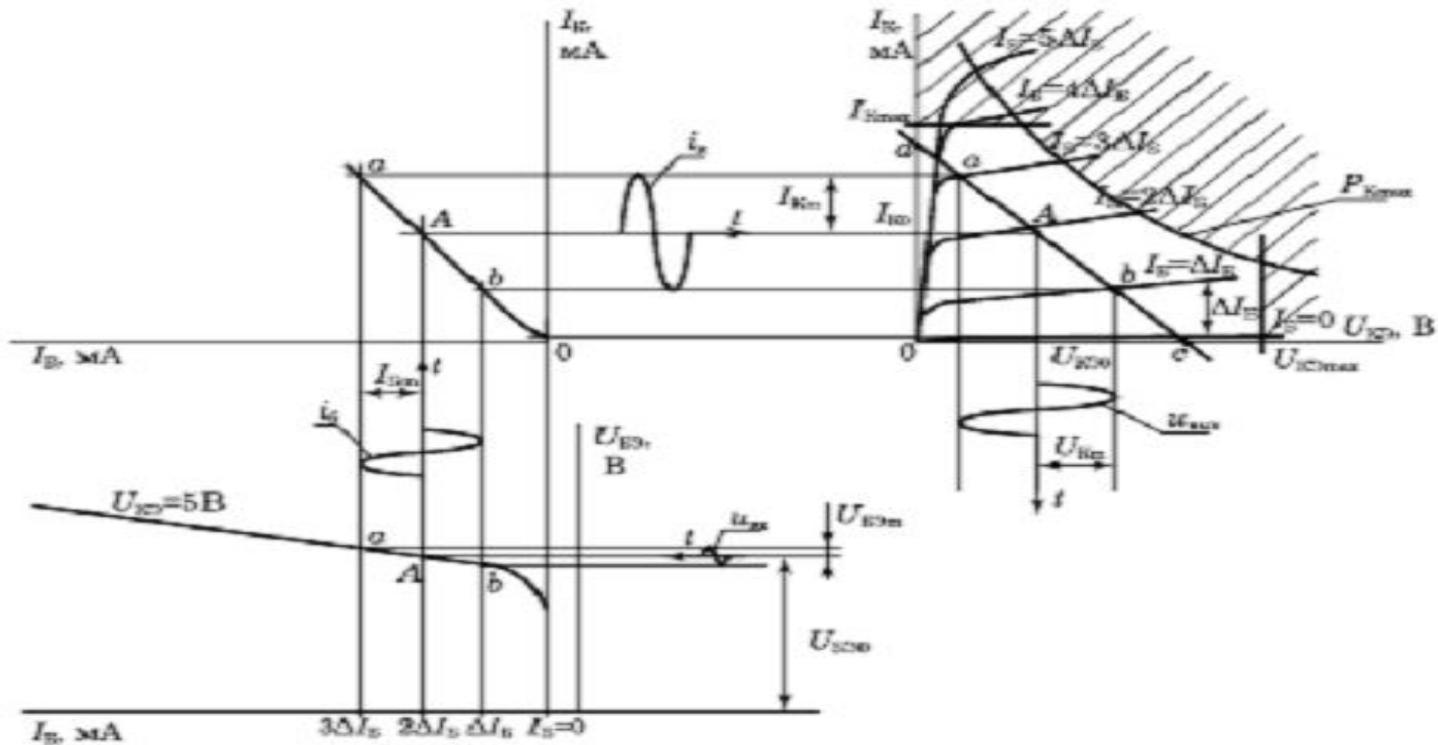


Рис. 1.22. Графоаналитический метод расчёта

$$\beta = 30 \dots 50$$

# Усилительный режим

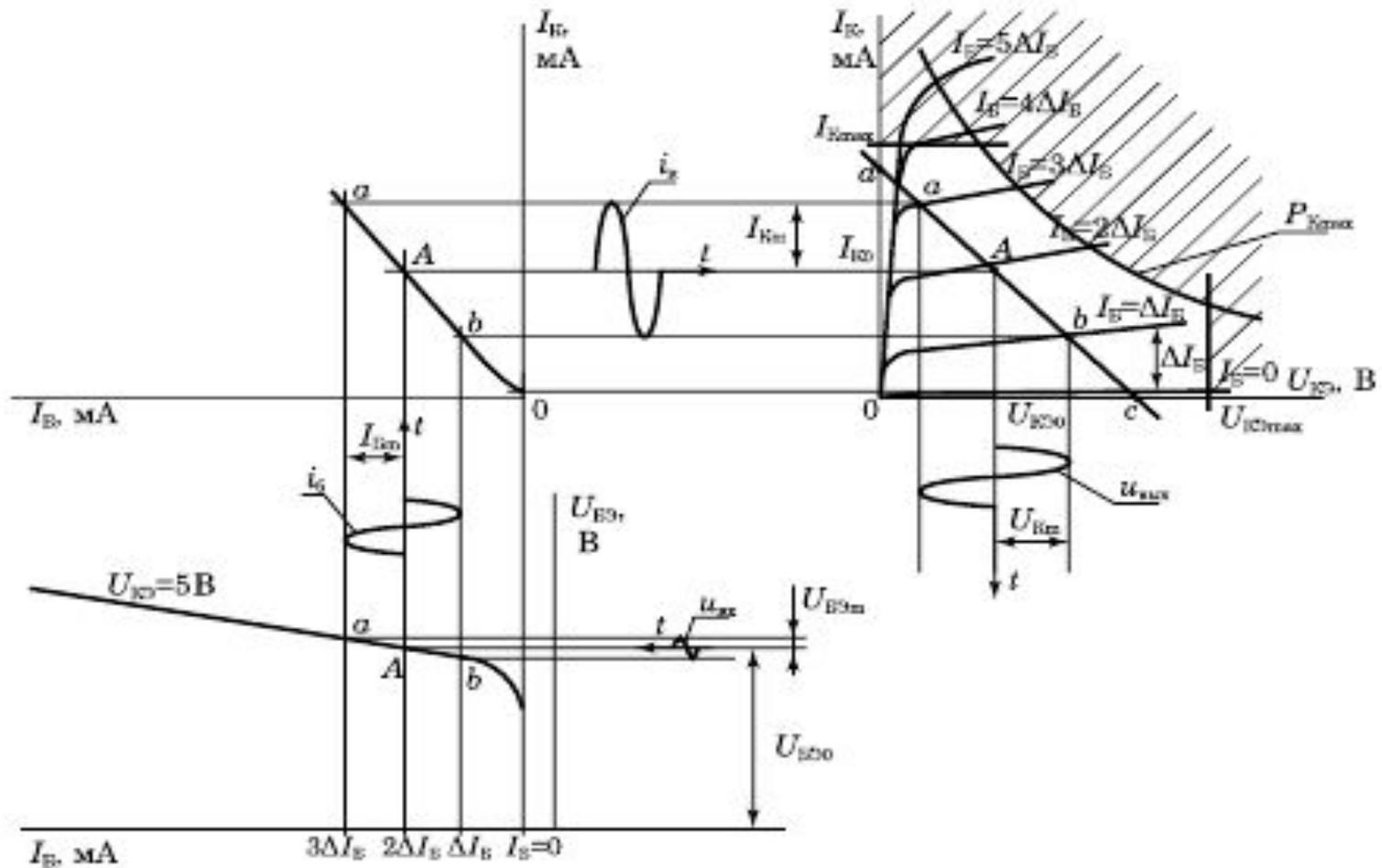
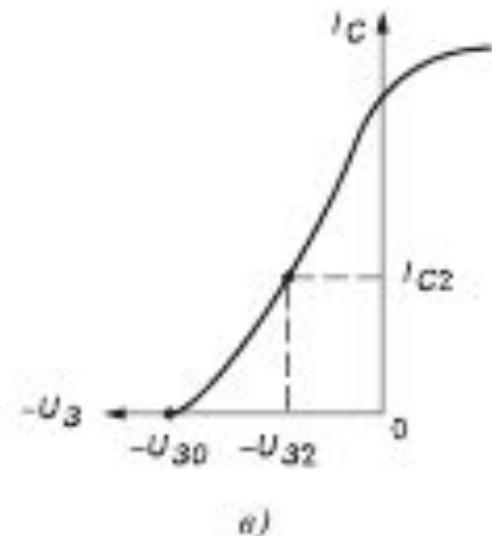
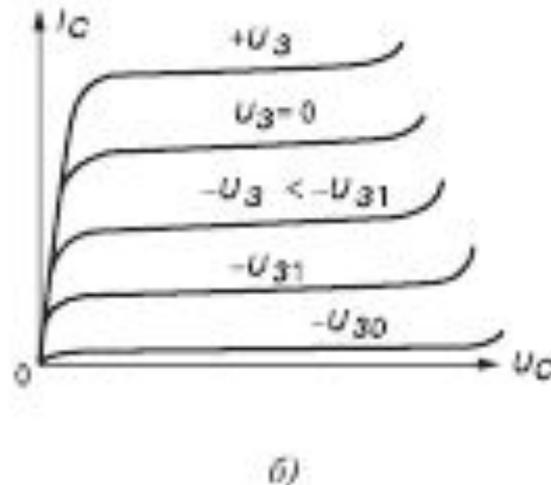
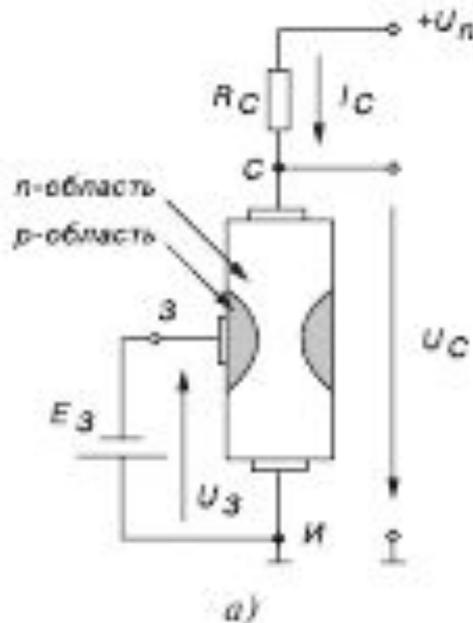


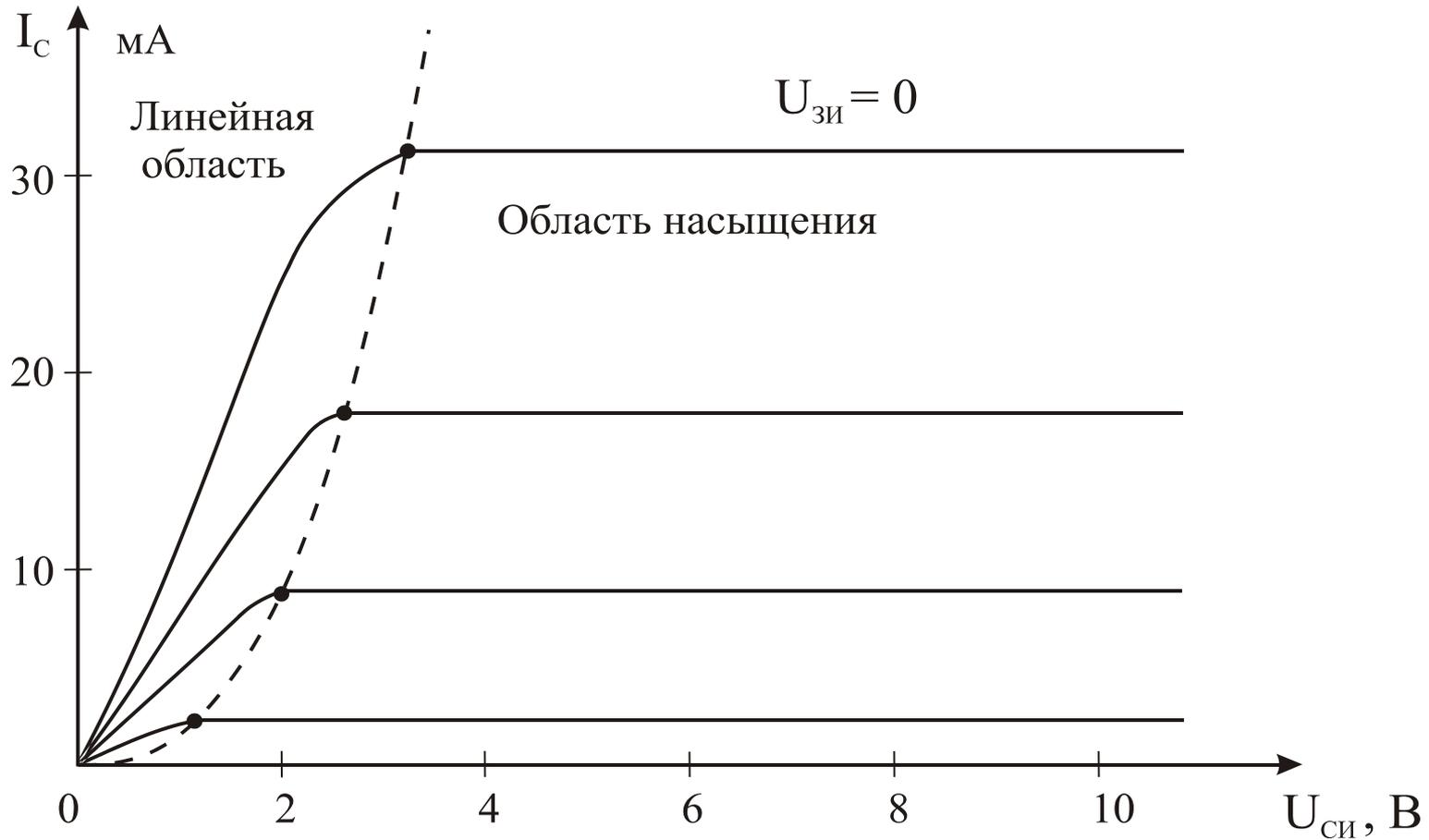
Рис. 1.22. Графоаналитический метод расчёта

# Полевые транзисторы

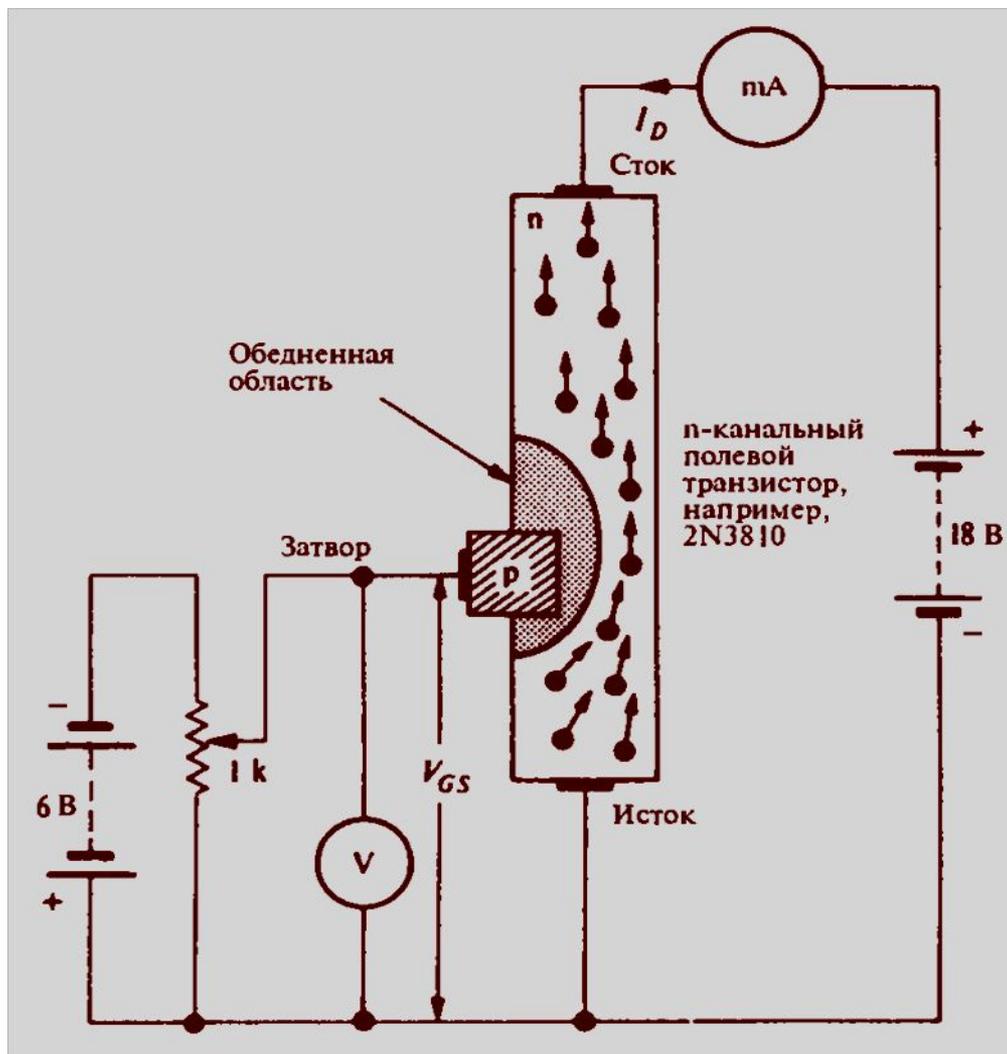
- Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, в котором ток стока ( $I_C$ ) через полупроводниковый канал  $n$  или  $p$ -типа управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором ( $Z$ ) и истоком ( $И$ )



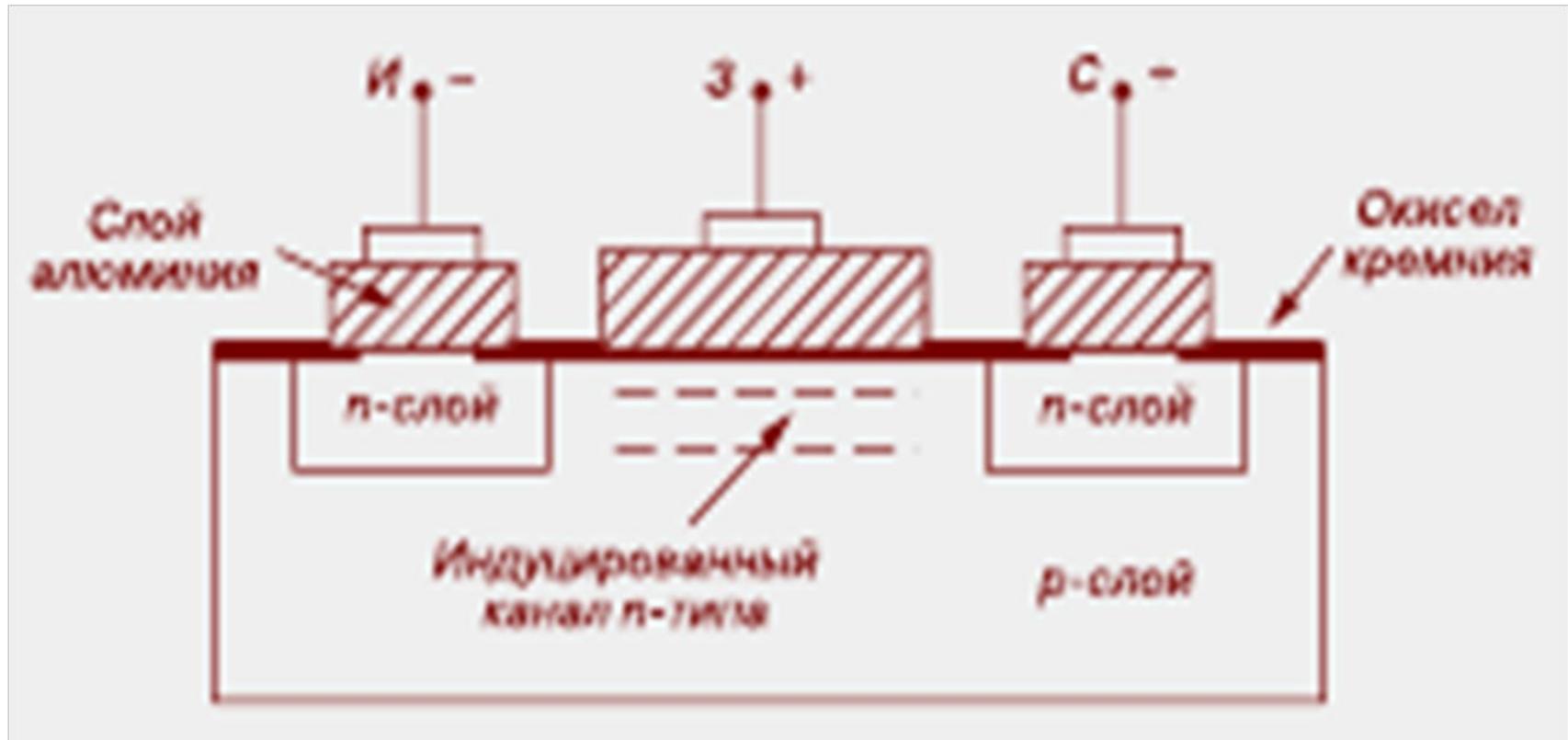
# Полупроводниковый транзистор в управляющем режиме переходом



# Принцип действия полевого транзистора Джонс



# МОП – транзистор Джонс



# Применение транзисторов

- На базе транзисторов можно строить аналоговые и цифровые устройства.
- [Аналоговый сигнал](#) представляет собой непрерывную функцию, с неограниченным числом значений в различные моменты времени
- **усилители** - это устройства, которые за счёт энергии источника питания формируют новый сигнал, являющийся по форме более или менее точной копией заданного, но превосходит его по току, напряжению или по мощности.
- **Преобразователи электрических сигналов** (активные устройства аналоговой обработки сигналов) - выполняются на базе усилителей, либо путем непосредственного применения последних со специальными цепями обратных связей, либо путем некоторого их видоизменения. Сюда относят устройства суммирования, вычитания, логарифмирования, антилогарифмирования, фильтрации, детектирования, перемножения, деления, сравнения и др. Википедия

# ***Усилители постоянного и переменного тока***

- Усилители постоянного тока представляют собой усилители с непосредственной (гальванической) связью между каскадами. Они позволяют усиливать сигналы постоянного тока.
- Основной элементной базой для создания усилителей с непосредственной связью являются линейные интегральные схемы – операционные усилители.
- Усилители переменного тока строятся либо по схеме усилителей с непосредственной связью, либо с резистивно-емкостной или реже с взаимно индуктивной связью.

# Операционные усилители

- **Операционный усилитель и его особенности. К операционным усилителям относят унифицированные многокаскадные усилители, которые выполнены в виде интегральных схем и обладают следующими основными свойствами:**
- ***=> имеют два входа и один выход.* При этом один из входов является прямым, другой — инверсным. Увеличение напряжения на прямом входе усилителя вызывает увеличение выходного напряжения, а увеличение напряжения на инверсном выходе — уменьшение. При подаче на оба входа усилителя нулевого напряжения его выходное напряжение практически равно нулю. Благодаря этому ОУ имеет симметричную амплитудную характеристику;**
- ***=> имеют два вывода для подключения напряжения питания.* Обычно напряжения питания симметричны, например,  $\pm 6$  В. Реже встречаются несимметричные напряжения питания (например  $+12$  и  $-6$  В). Кроме этого ОУ имеют вспомогательные (не несущие функциональной нагрузки) выводы с метками FC — для присоединения цепей, корректирующих АЧХ ОУ, и с метками NC — для балансировки ОУ (установки нуля на выходе);**
- ***=> обладают очень большим коэффициентом усиления (порядка  $10^5 \dots 10^6$ ), высоким входным (от сотен кило-ом до сотен мегаом) и малым выходным (от единиц до нескольких сотен ом) сопротивлением, широкой полосой частот (от 0 до десятка мегагерц), низким уровнем шума и хорошей температурной стабильностью.***

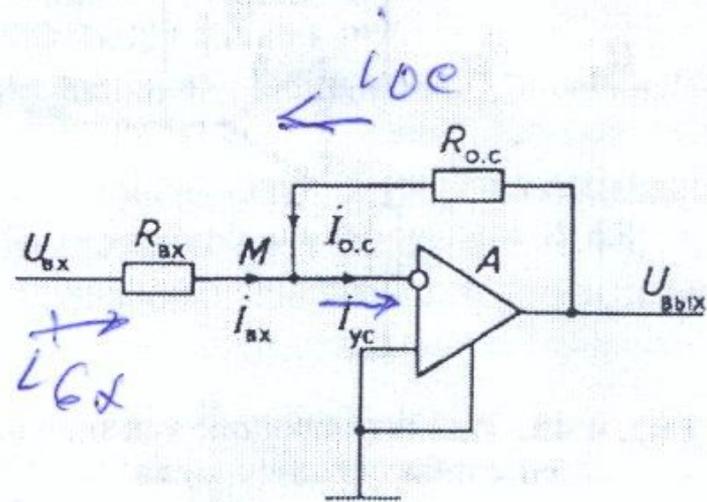
# Операционные усилители

$$I_{\text{ВХ}} \approx -I_{\text{О.С}}, \quad I_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}}, \quad I_{\text{О.С}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{О.С}}}, \quad \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}} = -\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{О.С}}}.$$

Отсюда

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{О.С}} U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}}.$$

Рис. 4.44. Инвертирующий усилитель на ОУ



# Сумматор и вычитатель на ОУ

Неинвертирующий сумматор (рис. 8). Составим систему уравнения для схемы на рис. 8 с учетом того, что  $I_1 + I_2 = 0$ :

$$(3) \quad \frac{U_{вх1} - U_2}{R_1} = \frac{U_2 - U_{вх2}}{R_2}; \quad U_1 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{вых} = U_2.$$

Подставив  $U_2$  в первое уравнение системы (3), находим из полученного уравнения

$$U_{вых} = K_1 U_{вх1} + K_2 U_{вх2},$$

$$\text{где } K_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4}{R_3}; \quad K_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4}{R_3}$$

При  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  получаем  $U_{вых} = U_{вх1} + U_{вх2}$ .

Вычитатель (рис. 9). Составим систему уравнения для схемы на рис. 9

$$(4) \quad \frac{U_{вх1} - U_1}{R_1} = \frac{U_1 - U_{вых}}{R_2}; \quad U_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{вх2} = U_1.$$

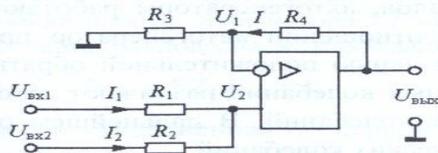


Рис. 8. Неинвертирующий сумматор

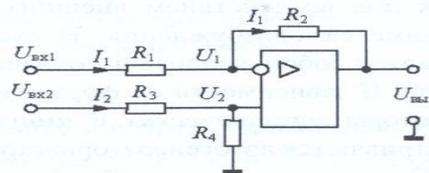


Рис. 9. Вычитатель

Подставив  $U_1$  в первое уравнение системы (4), находим из полученного уравнения

$$(5) \quad U_{вых} = K_2 U_{вх2} - K_1 U_{вх1},$$

где  $K_1 = \frac{R_2}{R_1}$ ;  $K_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$ . При  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  получаем

$$(6) \quad U_{вых} = U_{вх2} - U_{вх1}.$$

Выражение (5) относится к общему случаю операции вычитания с весовыми коэффициентами  $K_1, K_2$ , выражение (6) — к обычной операции вычитания.

# Нелинейные функциональные узлы на ОУ

Нелинейные функциональные узлы на ОУ. Интегратор на ОУ. В интеграторе (рис. 4.52) цепь ООС частотно-зависимая и представляет собой конденсатор  $C$ .

Ранее было показано, что

$$i_{\text{вх}} = -i_{\text{о.с}}; \quad i_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{R}; \quad i_{\text{о.с}} = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\frac{1}{2\pi f C}}. \quad (4.28)$$

Тогда

$$\frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{R} = -2\pi \dot{U}_{\text{вых}} f C.$$

Отсюда

$$\dot{U}_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int \dot{U}_{\text{вх}} dt. \quad (4.29)$$

Произведение  $\tau = RC$  принято называть постоянной времени интегрирования. Чем больше  $\tau$ , тем меньше коэффициент передачи устройства. Работа интегратора пояснена временными диаграммами на рисунке 4.53.

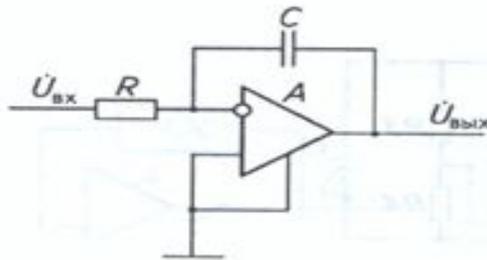


Рис. 4.52. Интегратор на ОУ

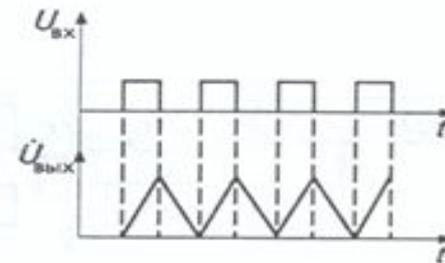


Рис. 4.53. Временные диаграммы напряжений интегратора