

# Пассивные элементы электронных схем

- Пассивные элементы - это резисторы, индуктивности, емкости, трансформаторы. Большое значение для определения свойств элементов имеет вольтамперная характеристика (ВАХ).
- Пассивные элементы могут быть линейные (в них ток пропорционален напряжению, соблюдается закон Ома, выполняется принцип суперпозиции) и
- нелинейные (характеризуются вольт-амперными характеристиками, имеющими нелинейный вид).

Первым активным (усиливающим) элементом в электронике была электронная лампа. В настоящее время основная роль в аналоговой и цифровой электронике принадлежит полупроводниковой технике

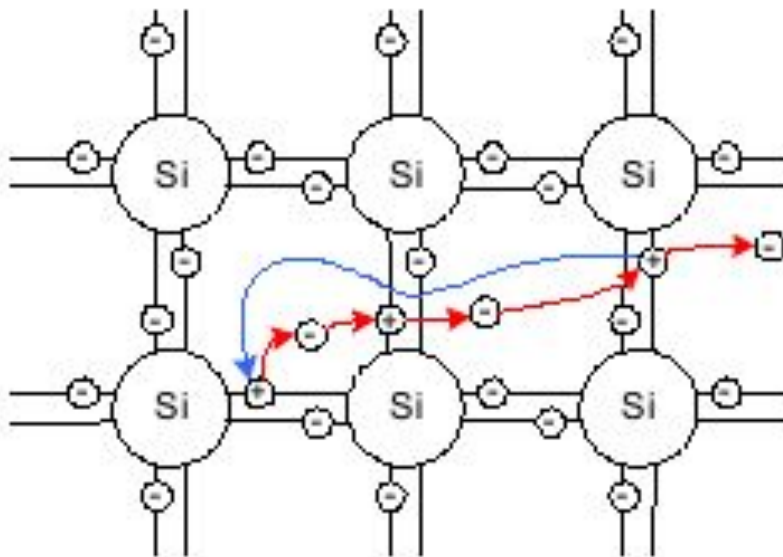
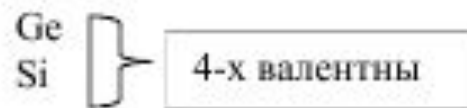
# Полупроводниковые элементы

## Электронно-дырочный переход

Москатов Е.А.

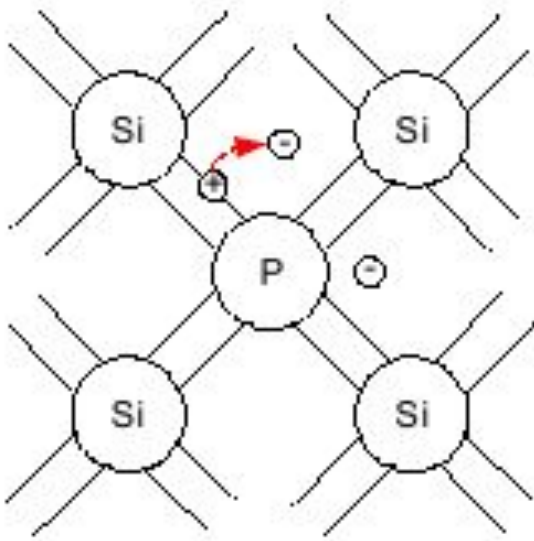
Transend/Электроника лекции для ЗО/WWW/grz.ru

**Собственная проводимость полупроводников.** Собственным 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.

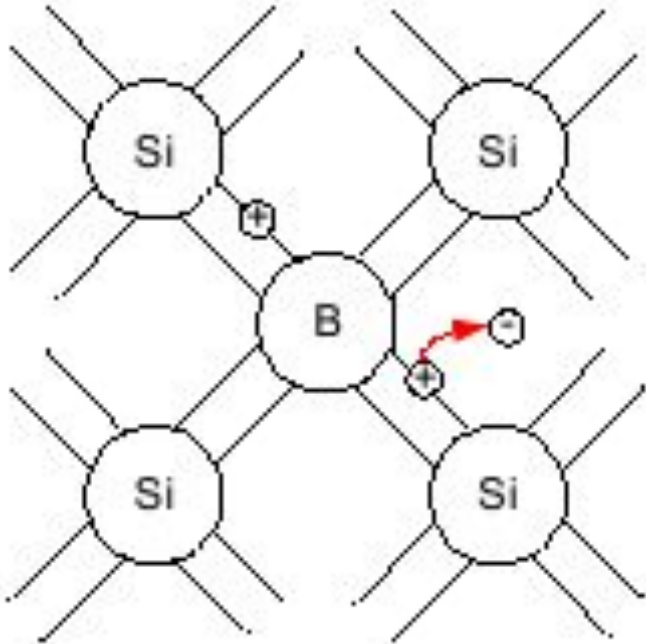
# Электронно-дырочный переход



**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 –**

# 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

Примесь, при которой  $p_i > n_i$ , называется **акцепторной**.  
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.

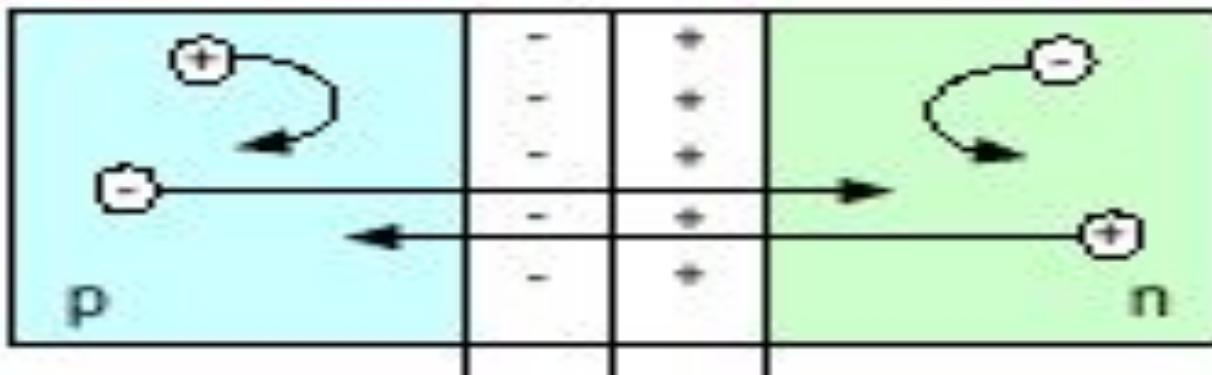
## Электронно-дырочный (p-n) переход

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. На границе раздела возникает внутреннее электрическое поле p-n перехода, которое будет тормозящим для основных носителей заряда и будет их отбрасывать от границы раздела.



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

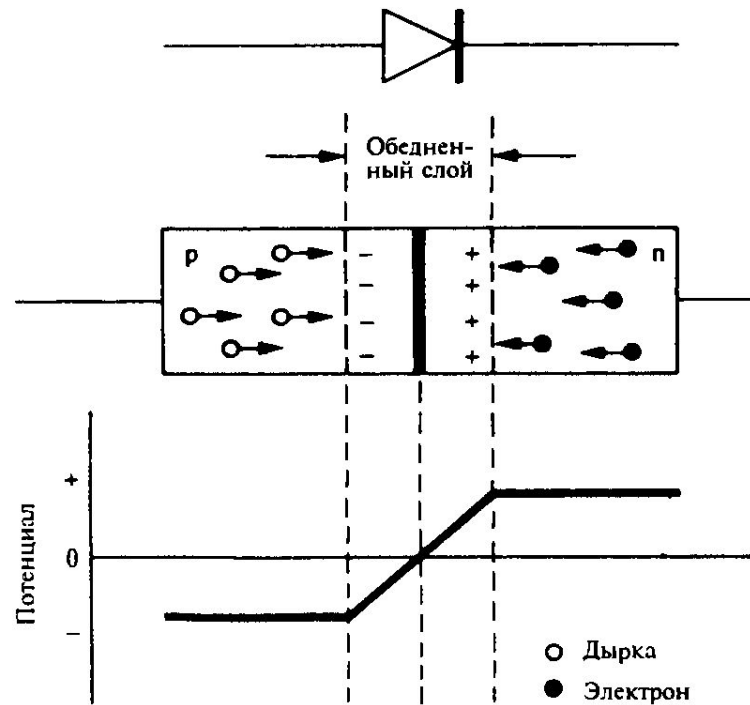
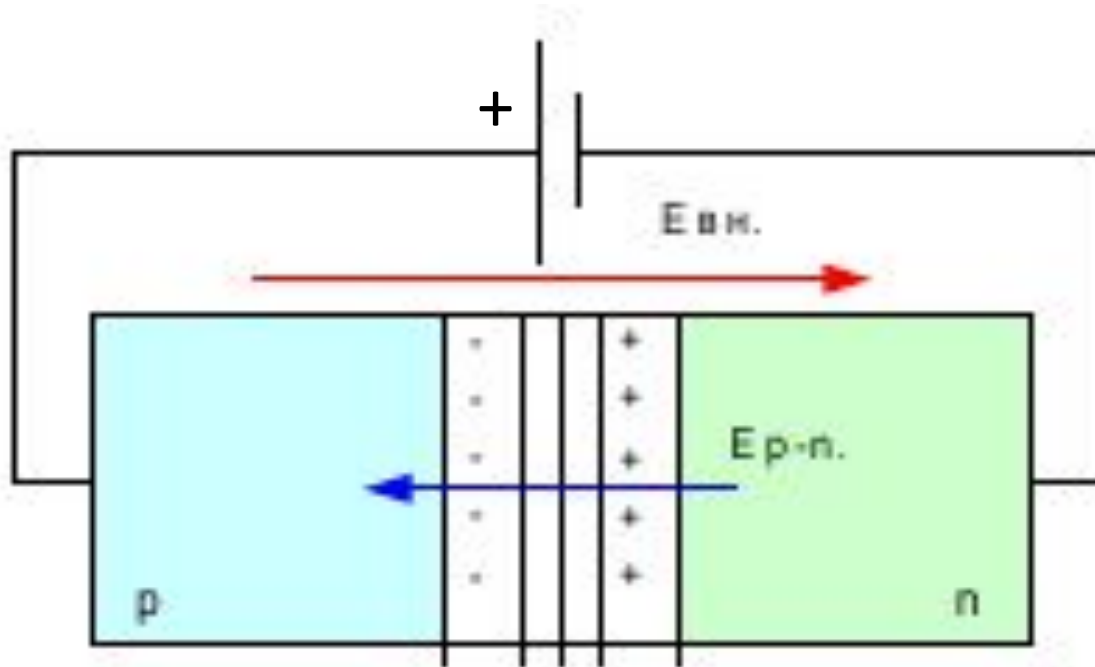


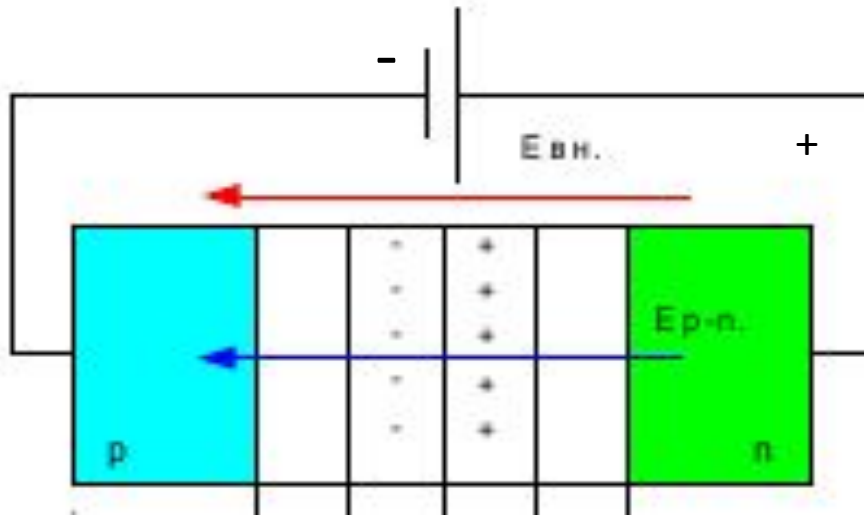
Рис. 1.9. Условное обозначение полупроводникового диода,  $p$ - $n$  переход с обедненным слоем и изменение потенциала.

# 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

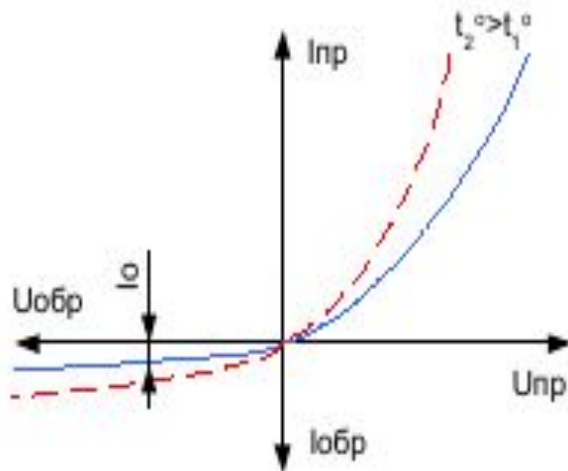


Если подключить внешнее напряжение минусом на p-область, а плюсом на n-область, то возникает внешнее электрическое поле, линии напряжённости которого совпадают с внутренним полем p-n перехода. В результате это приведёт к увеличению потенциального барьера и ширины p-n перехода. Основные носители заряда 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



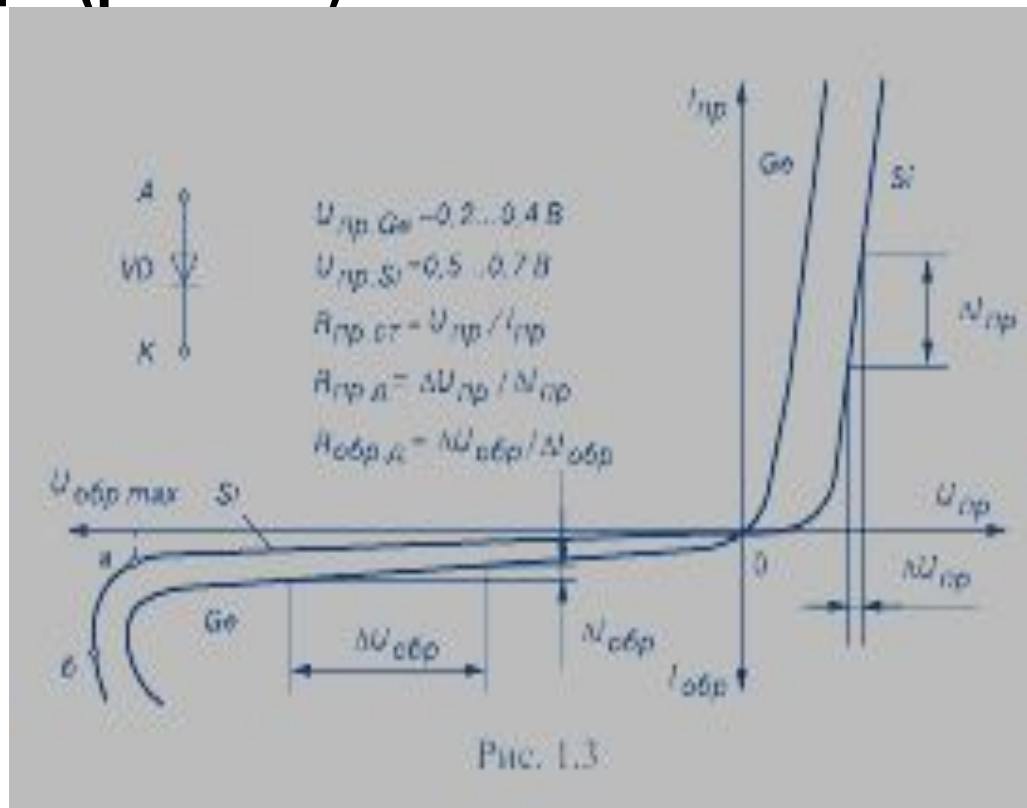
# Свойства p-n перехода

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



# 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).

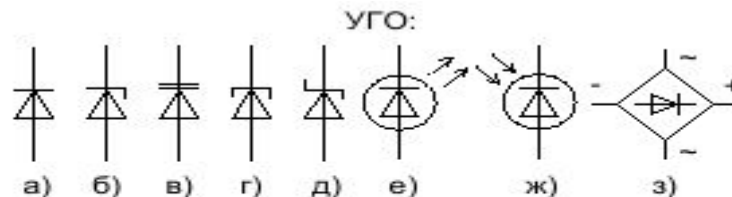


# Устройство, классификация и основные параметры полупроводниковых диодов

- 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

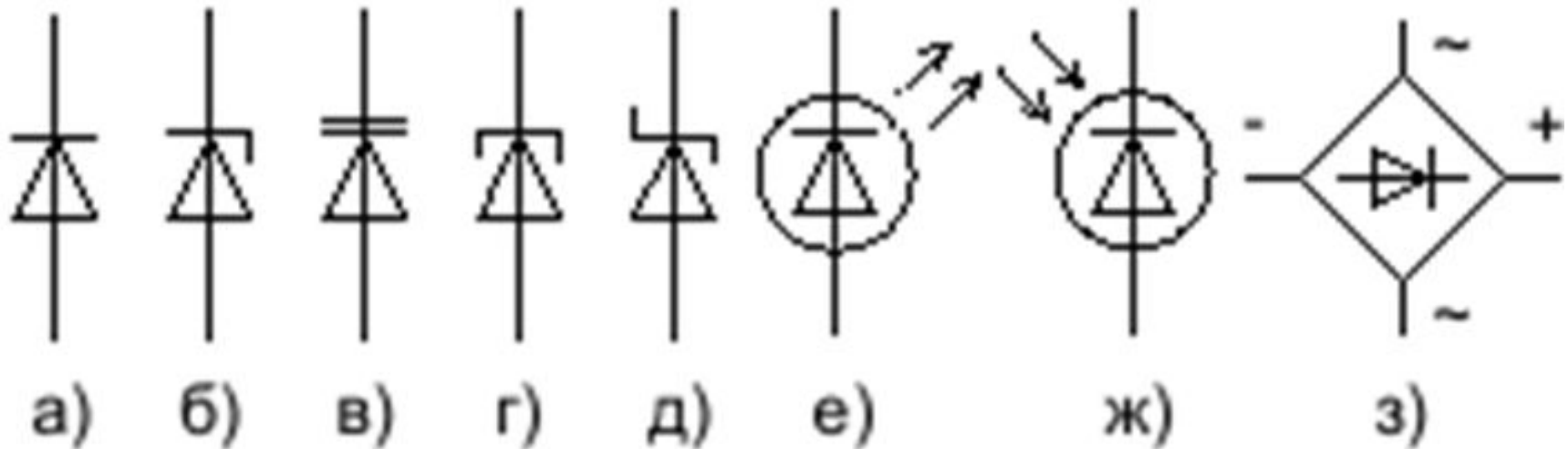
- Новый ГОСТ на маркировку диодов состоит из 4 обозначений:
- К С -156 А
- Г Д -507 Б
- I II III IV
- Рис. 26
- **I – показывает материал полупроводника:**
- Г (1) – германий; К (2) – кремний; А (3) – арсенид галлия.
- **II – тип полупроводникового диода:**
- Д – выпрямительные, ВЧ и импульсные диоды; 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.**



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

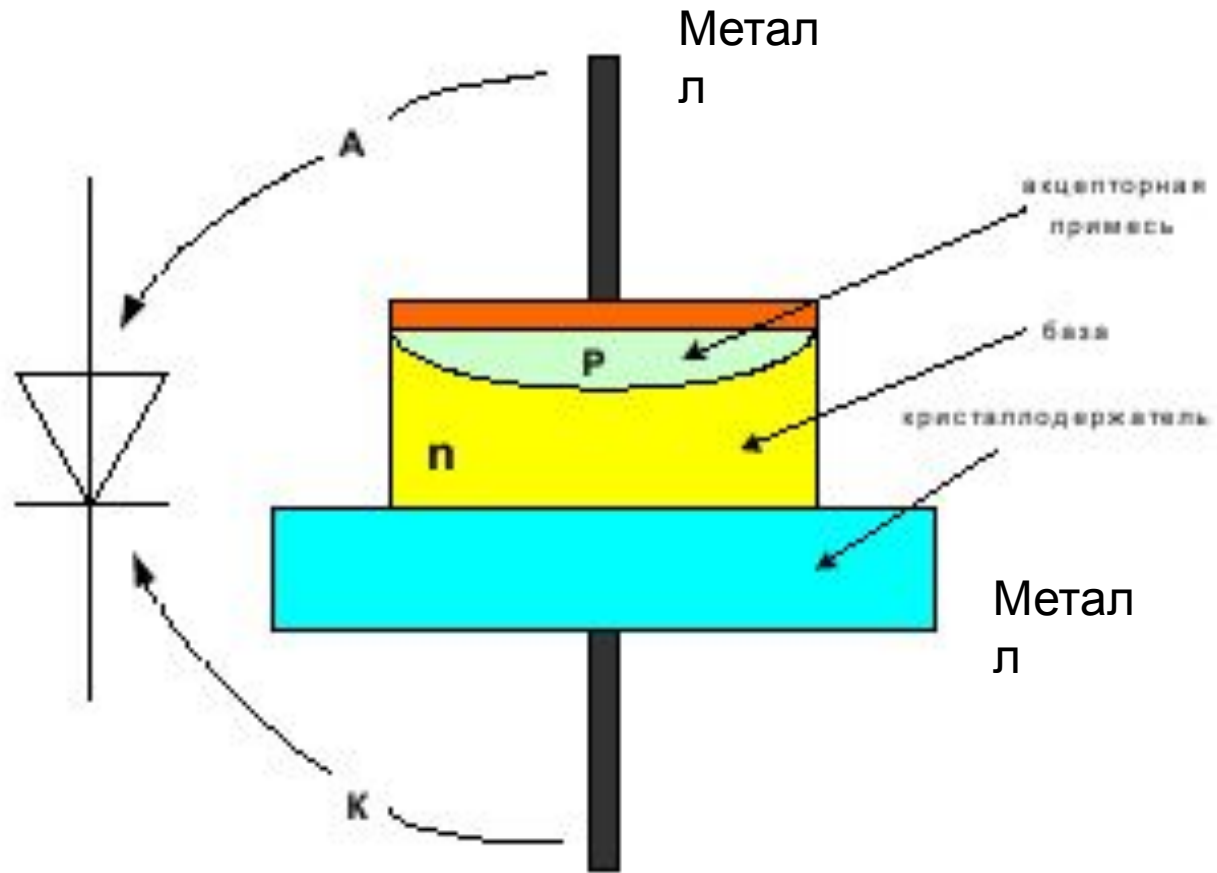
# Условно-графическое обозначение

УГО:

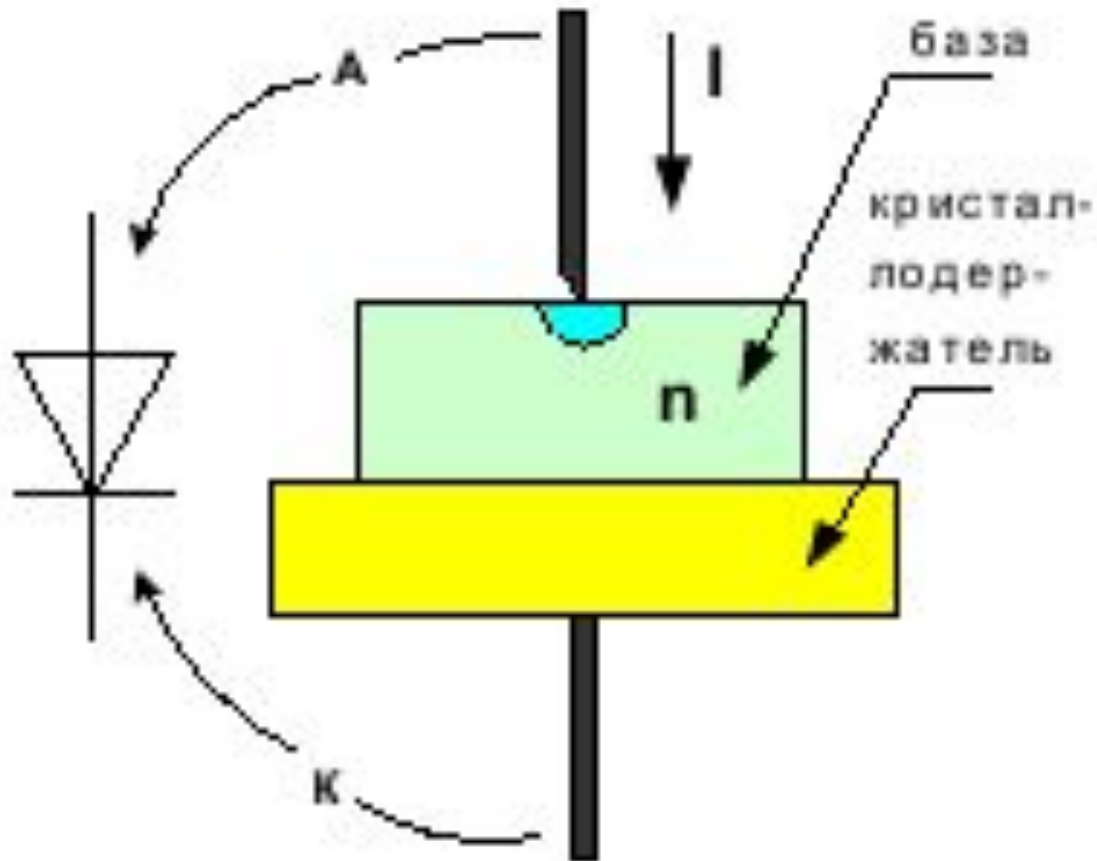


а) Так обозначают выпрямительные, высокочастотные, СВЧ, импульсные и диоды Гана; б) стабилитроны; в) варикапы; г) тоннельные диоды; д) диоды Шоттки; е) светодиоды; ж) фотодиоды; з) выпрямительные блоки

# Устройство плоскостных диодов



# Устройство точечных ДИОДОВ



# 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 (только биполярные транзисторы): с прямой проводимостью (p-n-p - структура) или с обратной проводимостью (n-p-n - 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), 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

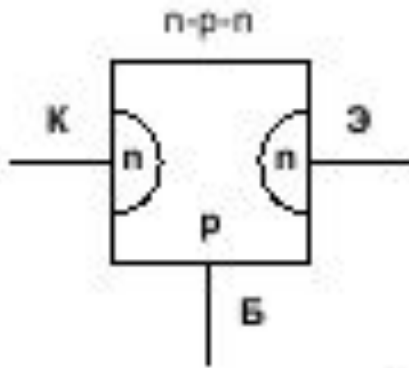


Рис. 60

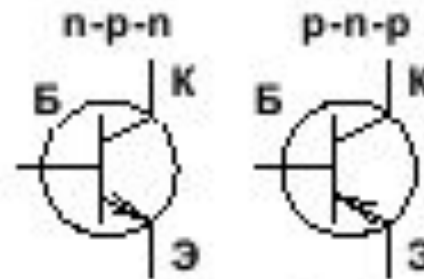
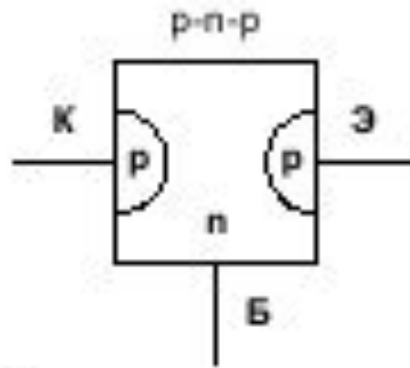


Рис. 61

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

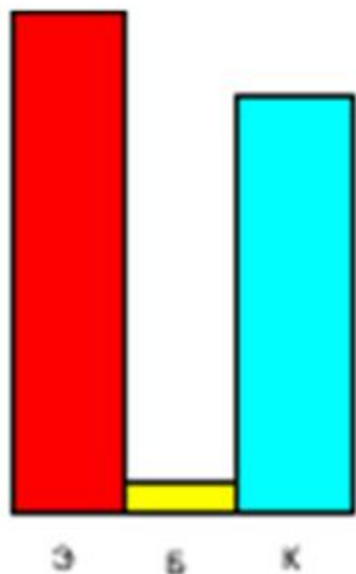


Рис. 62

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.

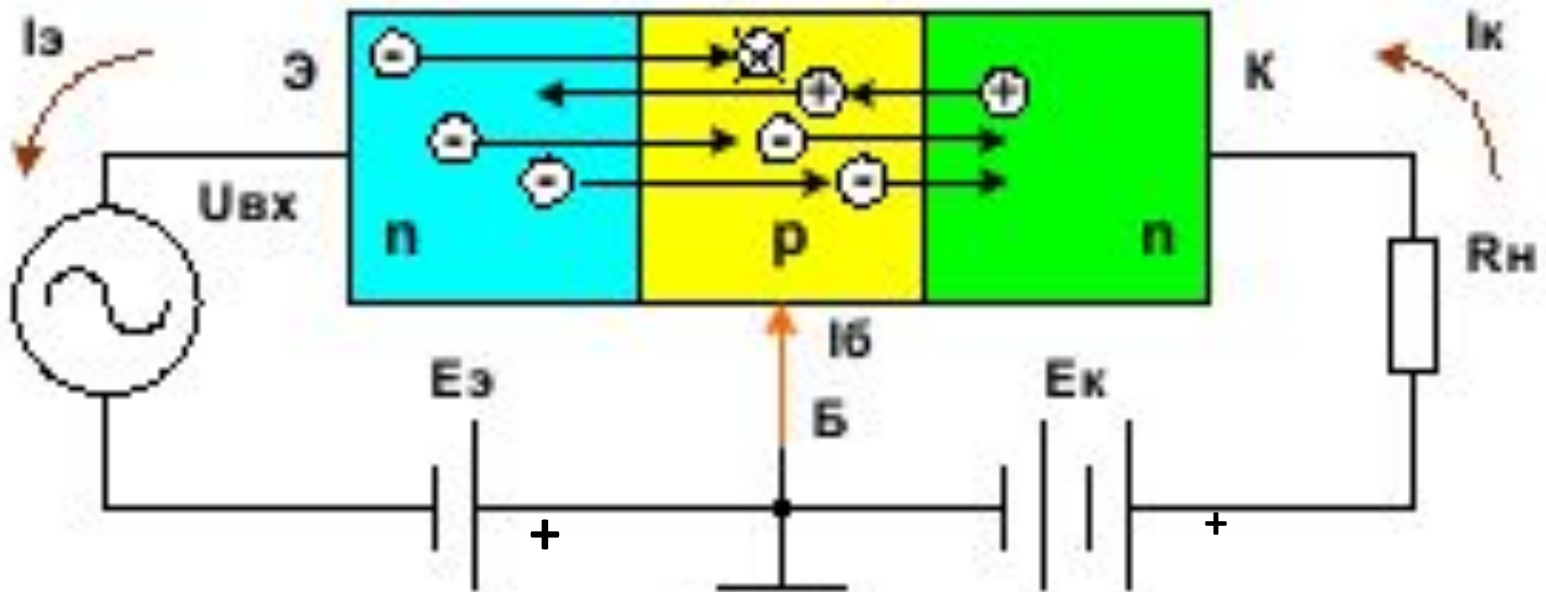


Рис. 63

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.

# Принцип действия биполярных транзисторов.

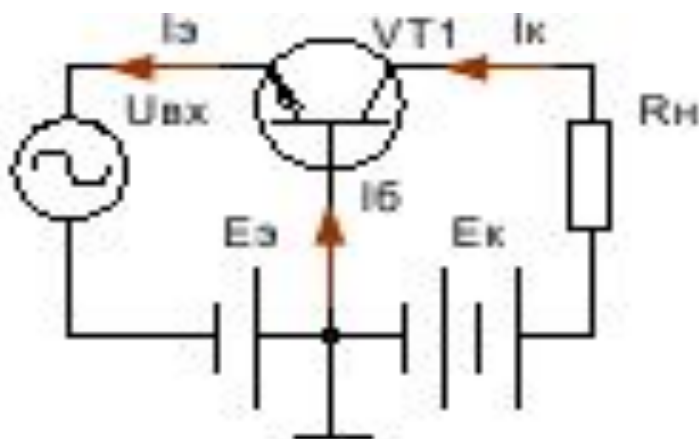


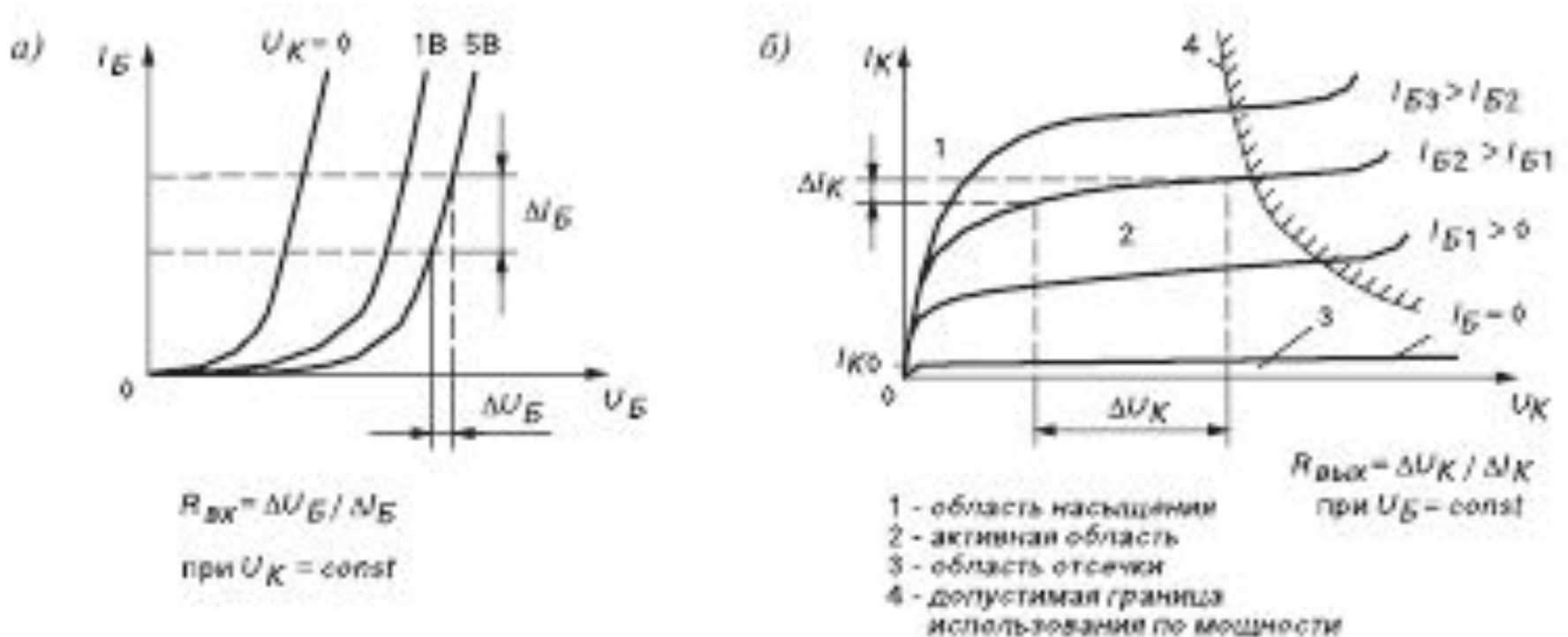
Рис. 64

$$I_{ВХ} = I_{Э}$$
$$I_{ВЫХ} = I_{К}$$

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

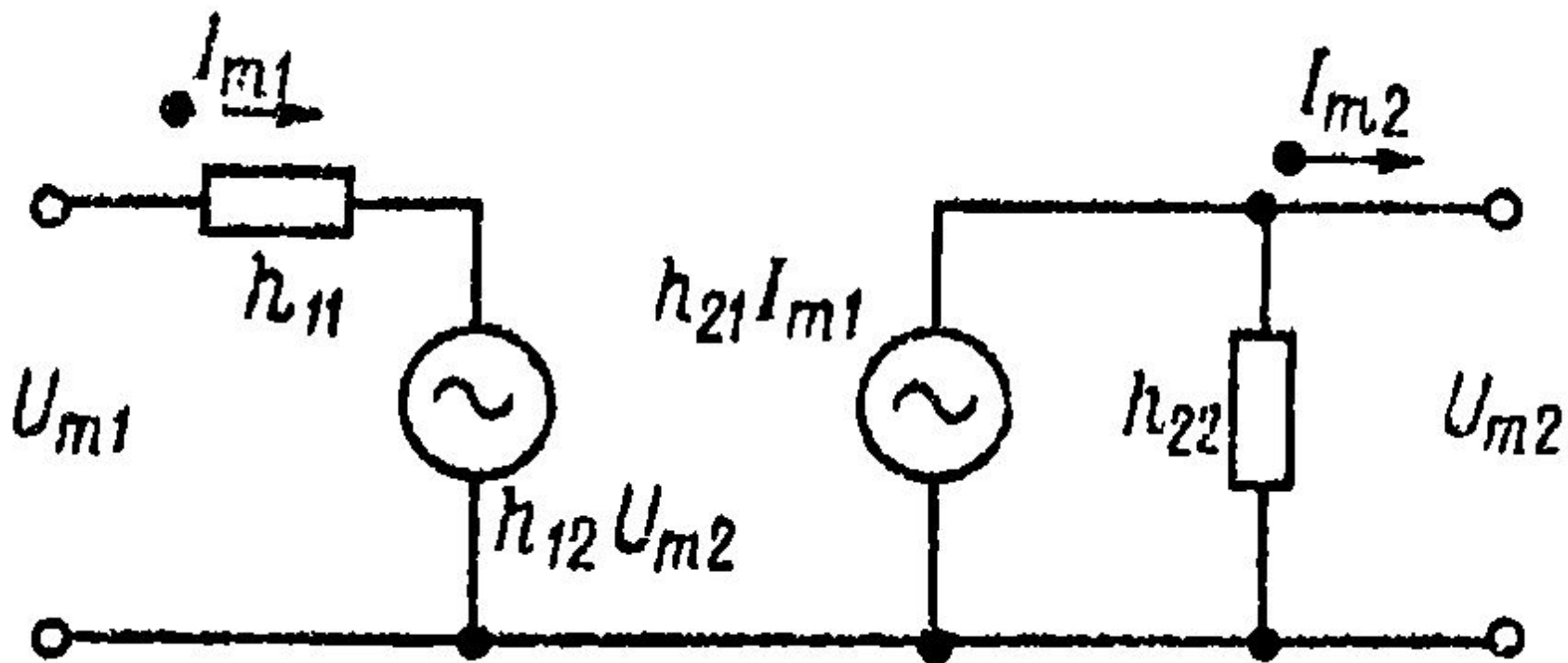
- Для сравнительного анализа транзисторов и аналитического расчета электронных схем, в которых они применяются, придумано и используется значительное количество параметров.
- В настоящее время основными считаются *смешанные* (или *гибридные*) параметры, обозначаемые буквой *h* или *H* (Жеребцов).
- *Это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

- (соединяется с управляемого и 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):**

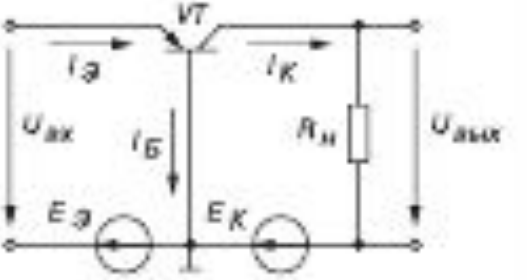
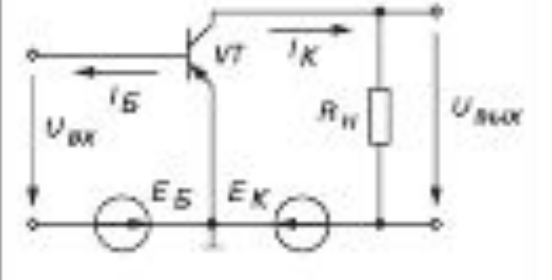
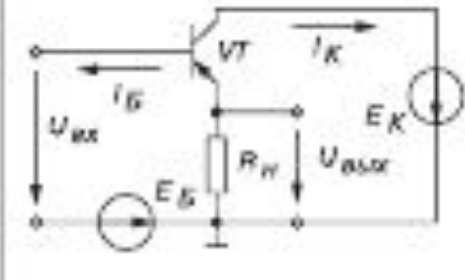
$$h_{21} = I_{m2}/I_{m1} \text{ при } U_{m2} = 0;$$

*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
		
$R_{\text{вх}} = R_Э + R_Б(1 - \alpha)$ <p>(5...100 Ом)</p> $h_{21Б} = \alpha \approx 1$ $K_{\text{нБ}}^* \approx \frac{R_н}{R_ЭБ}$ <p>(до 1000)</p> $K_{\text{рБ}}^* \approx \frac{R_н}{R_ЭБ}$ <p>(до 1000)</p> $R_{\text{вых}} \approx 0,1...1 \text{ МОм}$	$R_{\text{вх}} = R_Б + R_Э(\beta + 1)$ <p>(100...1000 Ом)</p> $h_{21Э} = \beta = -\alpha / (1 - \alpha)$ <p>(10...200)</p> $K_{\text{нЭ}} = \frac{-\beta R_н}{R_БЭ}$ <p>(10...1000)</p> $K_{\text{рЭ}} = \frac{\beta^2 R_н}{R_БЭ}$ <p>(до 10000)</p> $R_{\text{вых}} = 10...100 \text{ кОм}$	$R_{\text{вх}} \approx R_Б +$ $+ (R_Э + R_н)(\beta + 1)$ <p>(30...100 кОм)</p> $h_{21К} \approx \beta + 1$ <p>(10...100)</p> $K_{\text{нК}} \approx 1$ $K_{\text{рК}} \approx \beta$ <p>(10...200)</p> $R_{\text{вых}} \approx 10...100 \text{ Ом}$

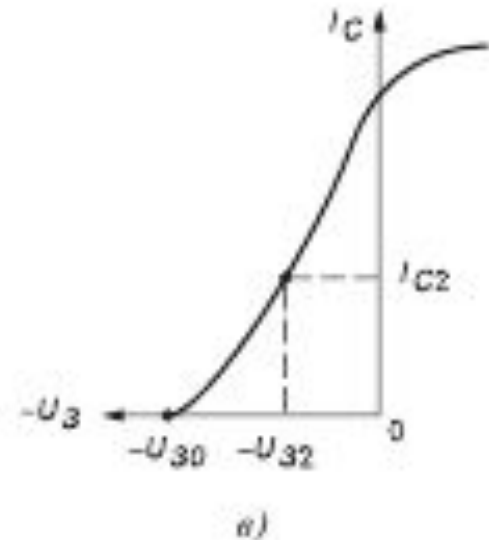
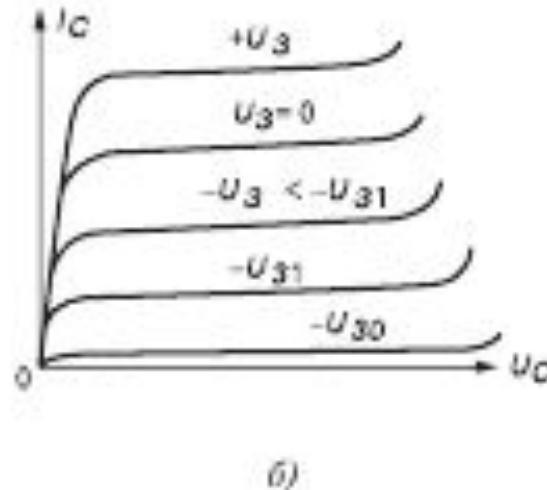
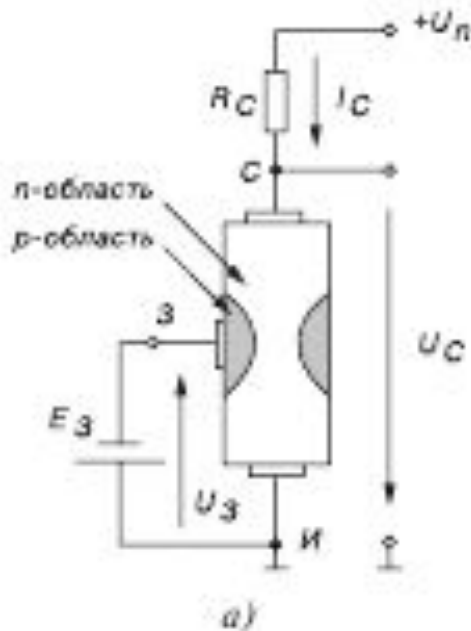
$K_{\text{нБ}}^*$  и  $K_{\text{рБ}}^*$  — коэффициенты усиления по напряжению и по мощности транзистора

# Усилительные свойства биполярного транзистора..

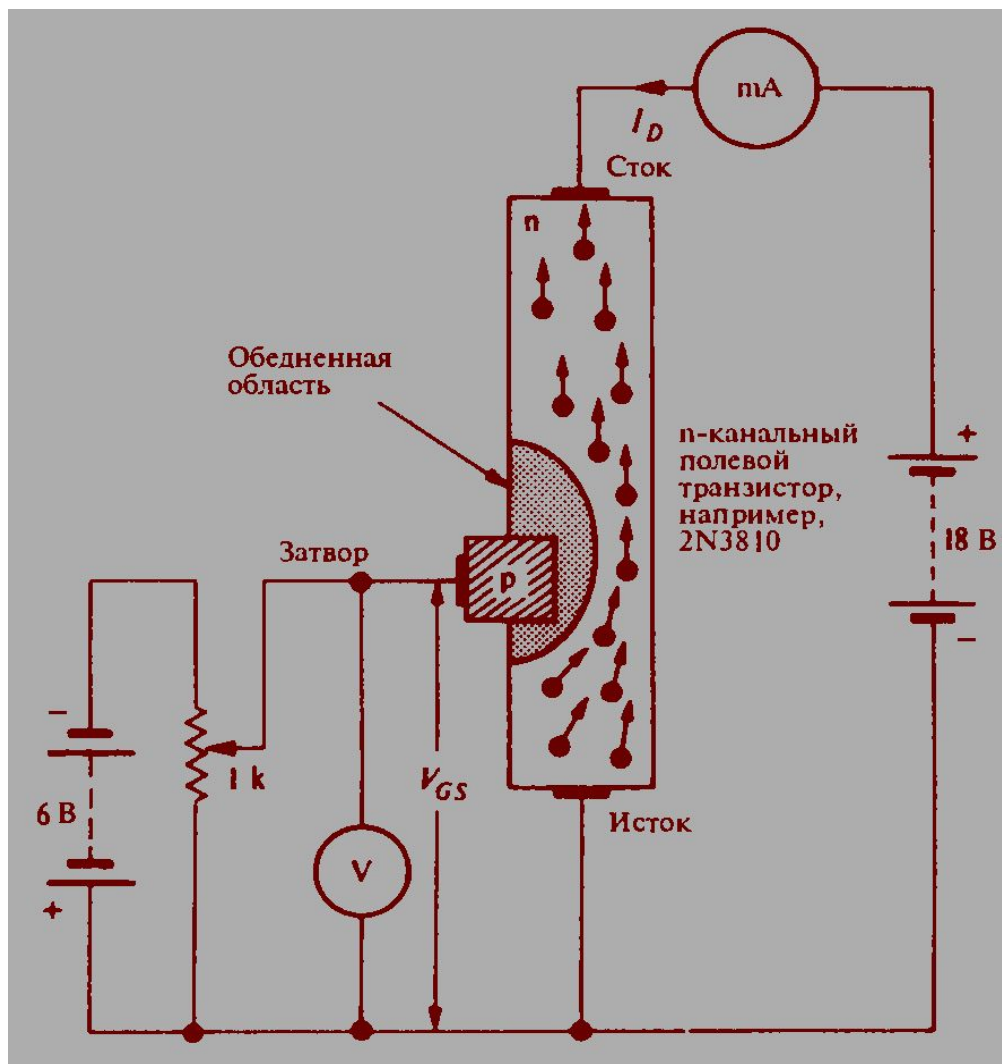
- Усилительные свойства биполярного транзистора. Независимо от схемы включения,
- транзистор характеризуется тремя коэффициентами усиления:
- $K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$  – по току;
- $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = (I_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{Н}}) / (I_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{ВХ}})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

# Полевые транзисторы

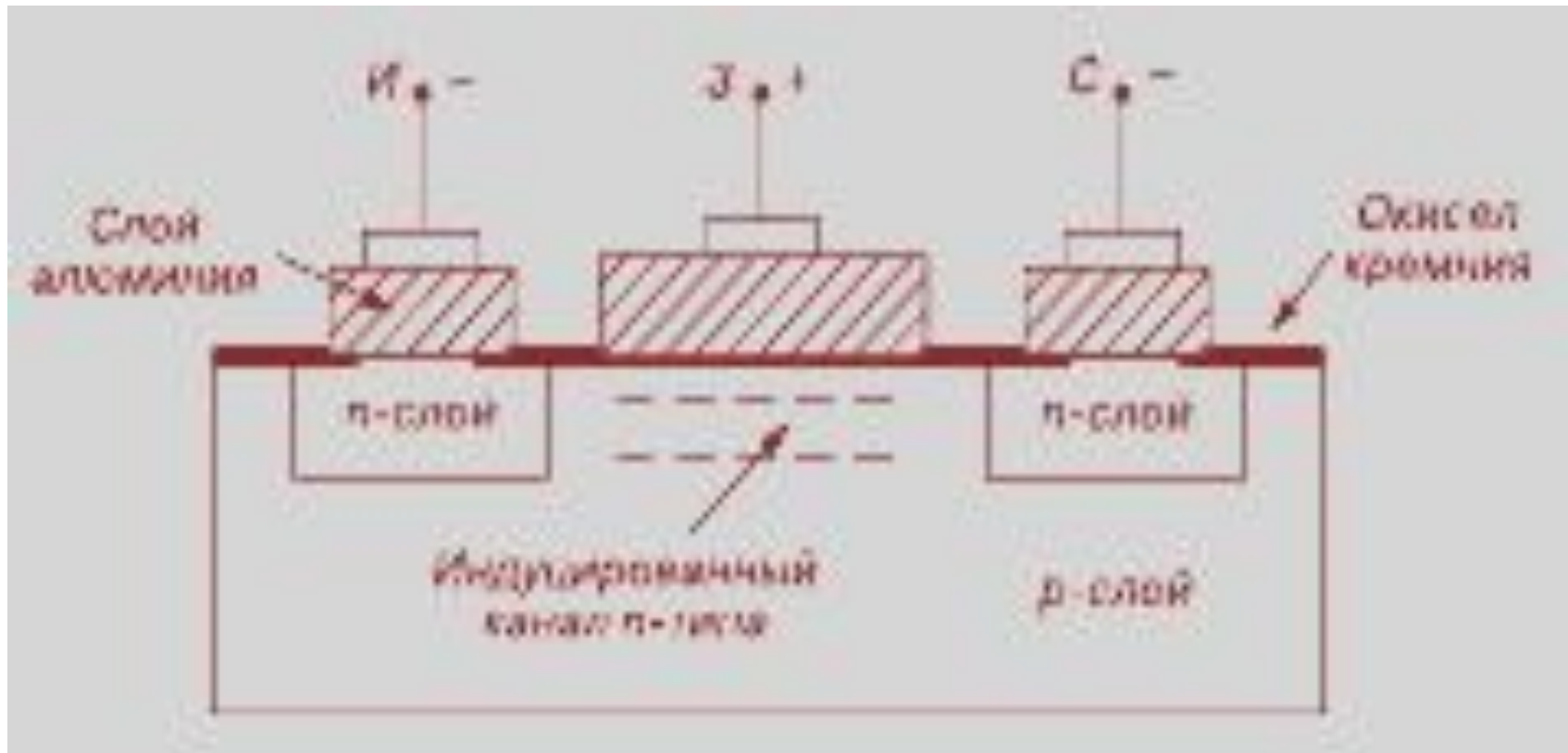
- Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, в котором ток стока (С) через полупроводниковый канал п или р типа управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором (З) и истоком (И)



# 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.

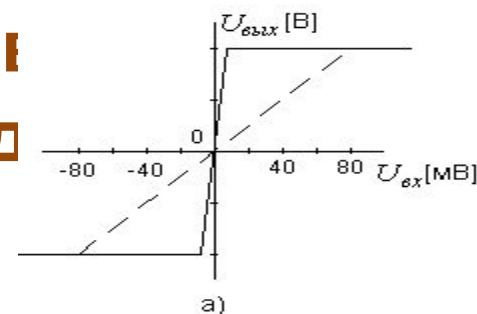


# Операционные усилители ОУ – это высококачественный усилитель постоянного тока.

- 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 килоом до сотен мегаом) и малым выходным (от единиц до нескольких сотен ом) сопротивлением, широкой полосой частот (от 0 до десятка

# Некоторые особенности использования ОУ

- Большое значение  $K_u$  ограничивает линейный участок передаточной характеристики ОУ очень малыми напряжениями по входу (см.рис.14.6а). Например, если  $K_u = 20000$ , а максимальное напряжение на выходе ОУ  $-OУ^{\pm} 10В$ , то максимально допустимый диапазон  $\pm 0,5мВ$  изменений входного напряжения лежит в пределах . При увеличении  $U_{ex}$  напряжения за эти границы выход будет изменяться



# Назначение ОУ

- Термин «операционный усилитель» первоначально использовали для обозначения усилителей постоянного тока, на которых строились аналоговые вычислительные машины. Предназначались эти высококачественные усилители для проведения математических операций в аналоговой форме (суммирование, вычитание, умножение, интегрирование и др.). В настоящее время операционные усилители (ОУ) выполняют исключительно в виде полупроводниковых интегральных микросхем. Это высококачественные усилители постоянного тока. Различают идеальный и реальный ОУ.
- Под идеальным ОУ понимают усилитель, обладающий следующими параметрами:  $K_U = \infty; R_{вх} = \infty; R_{вых} = 0; f_{мин} = 0; f_{max} = \infty; I_{вх} = 0$ .
- Реальные ОУ обладают параметрами, близкими к идеальным:  
 $K = 10^5 \dots 10^7; R_{вх} = 0,1 \dots 1,5 \text{ МОм (без ООС)}; R_{вых} = 50 \dots 600 \text{ Ом (без$

# Входные каскады ОУ

- Входные каскады ОУ представляют собой дифференциальные усилители и имеют два входа: инвертирующий и неинвертирующий (рис. 1). На инвертирующий вход подается входной сигнал  $U_{вх1}$ . Этот сигнал находится в противофазе с выходным  $U_{вых}$  (рис. 4.42, а). Сигнал, поданный на неинвертирующий вход ( $U_{вх2}$ ), синфазен с выходным сигналом (рис. 4.42, б). Следовательно, при наличии двух входных сигналов выходной сигнал определяется следующим образом:  
$$U_{вых} = -K_U(U_{вх1} - U_{вх2})$$

# Принцип построения и свойства дифференциального каскада

НОВОЖИЛОВ

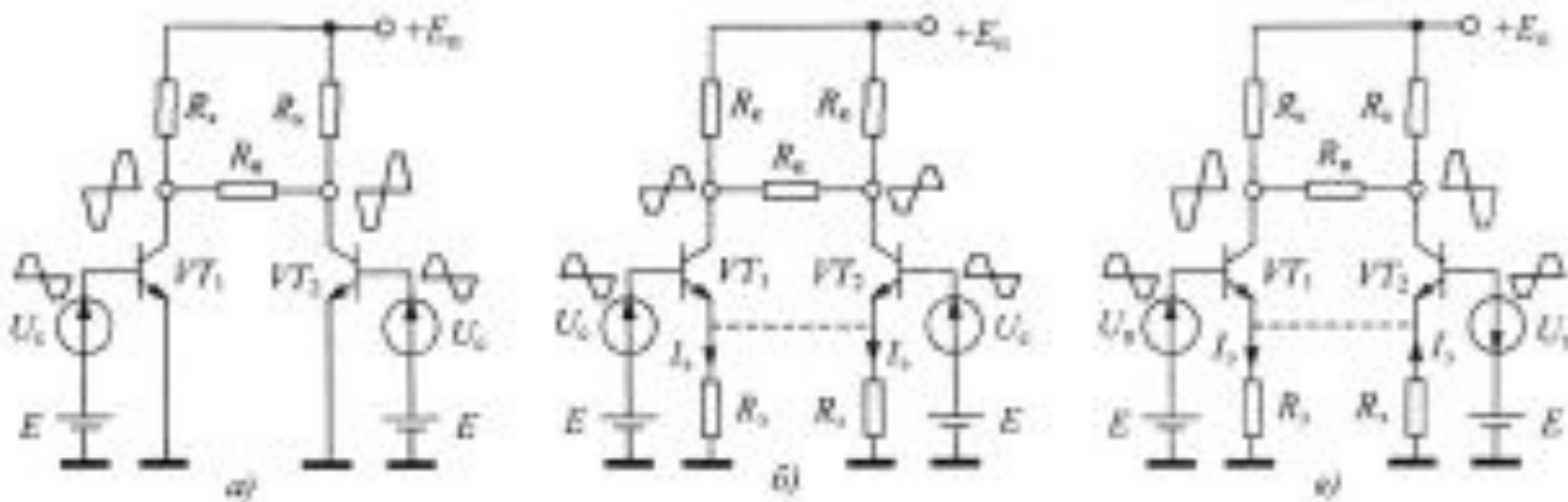


Рис. 1. Принцип построения и свойства дифференциального каскада

# Графики напряжений на входе и выходе

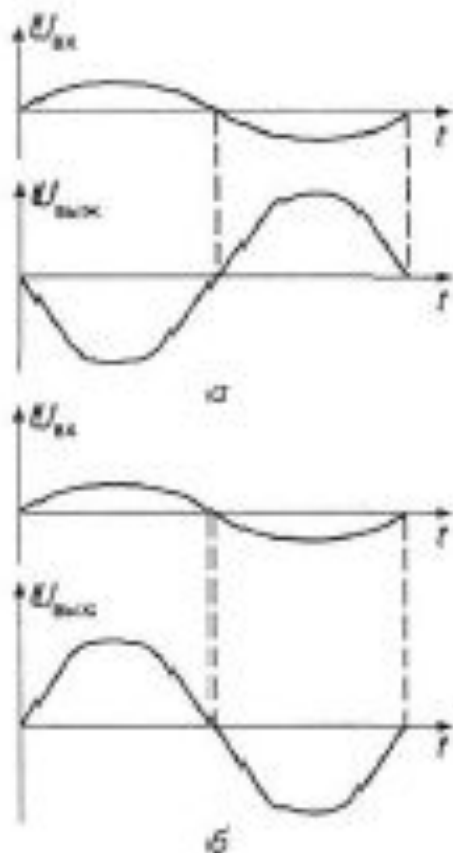


Рис. 4.42. Временные диаграммы входных и выходных сигналов ОУ:

а — в противофазе; б — в фазе

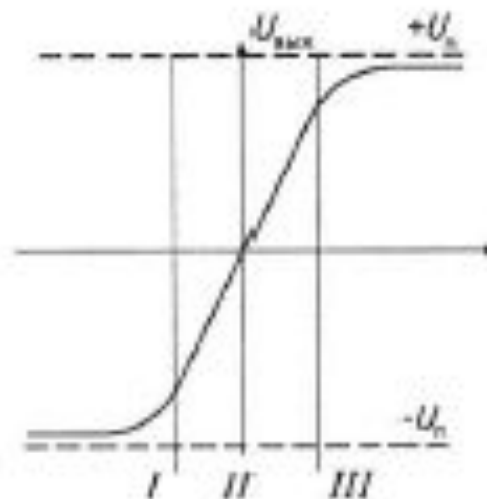
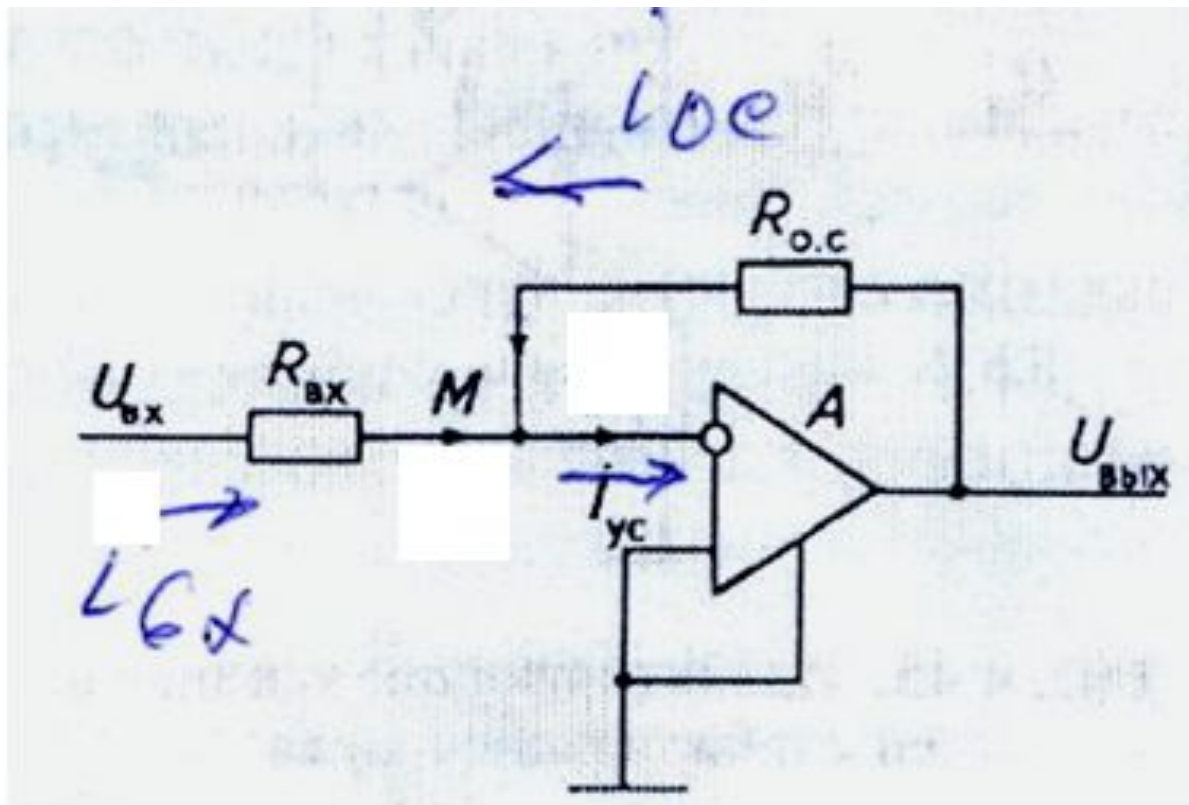


Рис. 4.43. Амплитудная характеристика ОУ:

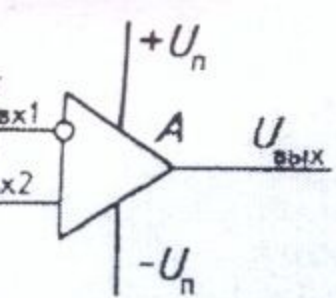
I, III — зоны насыщения; II — линейная зона

# Мнимая земля



Точку  $M$  в схеме на рис., где резисторы подключаются к инвертирующему входу, называют мнимой землей, потому что в случае, когда коэффициент усиления напряжения стремится к бесконечности, разность потенциалов между входами усилителя должна быть пренебрежимо малой, а ток входа равен нулю





# Инвертирующий усилитель

## Выходное напряжение ОУ в зависимости от входного

4.41. Условное обозначение ОУ

$$I_{\text{вх}} \approx -I_{\text{о.с}}, \quad I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}, \quad I_{\text{о.с}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{о.с}}}, \quad \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}} = -\frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{о.с}}}$$

Отсюда

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_{\text{о.с}} U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}$$

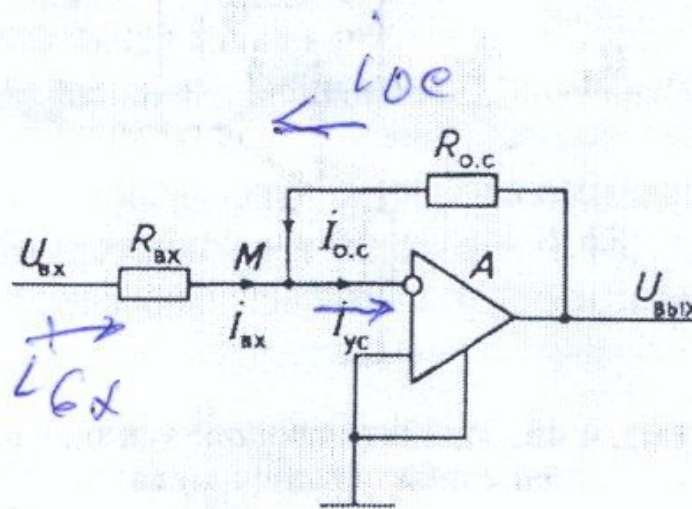


Рис. 4.44. Инвертирующий усилитель на ОУ



# Основные характеристики инвертирующего ОУ

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = - R_{\text{ОС}} / R_{\text{ВХ}}$$

$$R_{\text{ВХ}} = 5 \dots 10 R_{\text{ВЫХ}} \text{ ис}$$

Для уменьшения смещения нуля на выходе усилителя в цепи инвертирующего входа включают резистор  $R$  (рис. 4.45), его сопротивление определяют из выражения

$$R = R_{\text{ВХ}} R_{\text{ОС}} / (R_{\text{ВХ}} + R_{\text{ОС}})$$

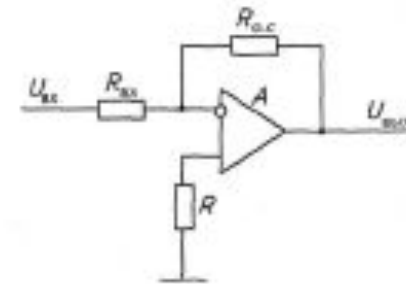
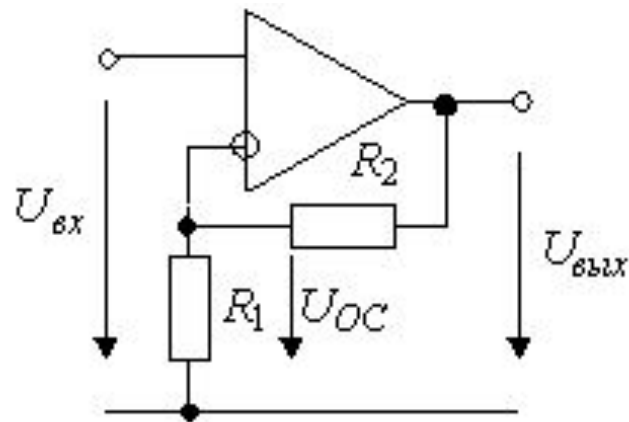


Рис. 4.45. Инвертирующий усилитель со стабилизацией нуля

# Неинвертирующий ОУ



б)

Входной сигнал подается на прямой вход. С выхода ОУ напряжение ОС через делитель  $R_1R_2$  поступает на инвертирующий вход ОУ

$$U_{ос} = U_{вых} R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$U_{ос} = U_{вх} \text{ Отсюда } K_u = (R_1 + R_2) / R_1$$

# Повторитель напряжения на ОУ

- Он представляет собой неинвертирующий усилитель со 100%-ной обратной связью (рис. 4.47)

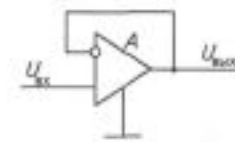


Рис. 4.47. Повторитель напряжения на ОУ

- Особенности повторителя:
- высокое входное сопротивление ( $K_{вх} \rightarrow \infty$ );
- низкое выходное сопротивление ( $R_{вых} \rightarrow 0$ );
- большой коэффициент усиления по току
- ( $K_I \rightarrow \infty$ );
- коэффициент усиления по напряжению несколько меньше единицы ( $K_u \sim 0,97...0,99$ ).

# Принципы построения функциональных узлов на ОУ.

- Рассмотрим особенности построения узлов, реализующих линейные операции. Для простоты изложения воспользуемся моделью идеального ОУ, который имеет:
- $\Rightarrow$  коэффициент усиления напряжения  $K_u \rightarrow \infty$
- $\Rightarrow$  входное сопротивление ОУ  $R_{вх} \rightarrow \infty$
- $\Rightarrow$  входной ток  $I_{вх}$  равен току  $I_{вых}$  в цепи обратной связи;
- $\Rightarrow$  выходное сопротивление ОУ  $R_{вых} \rightarrow 0$
- 

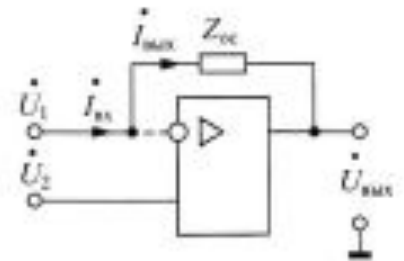


Рис. 3. Модель идеального операционного усилителя

# Интегрирующая и дифференцирующая схемы

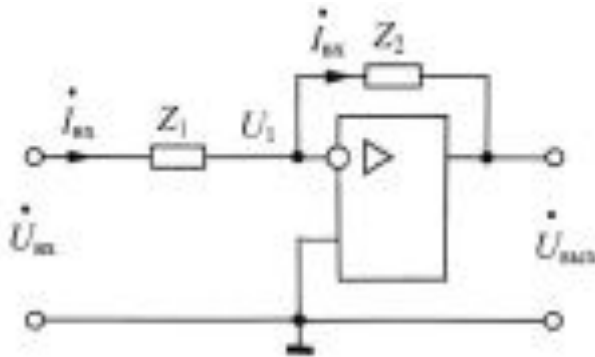


Рис. 4. Базовая схема для построения инвертирующего усилителя,

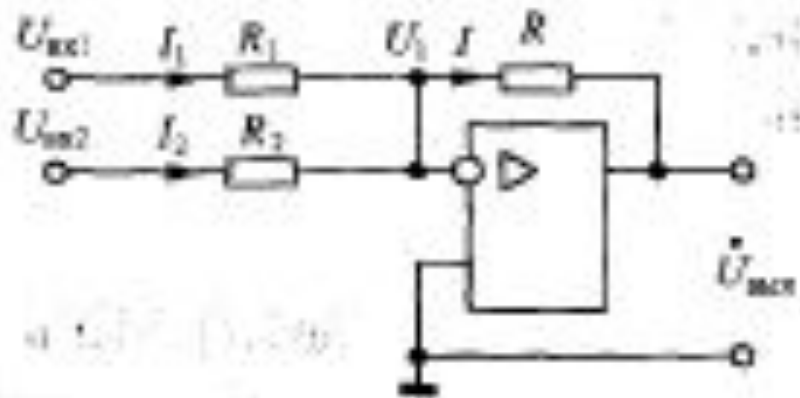
⇒ *интегратор*. Приняв в (1)  $Z_1 = R$ ,  $Z_2 = 1/(j\omega C)$ , получаем  $K_U = -1/(j\omega CR)$

или  $\dot{U}_{\max} = -\dot{U}_{\text{вх}} / (j\omega CR)$ , или  $u_{\max}(t) = -\frac{1}{RC} \int u_{\text{вх}}(t) dt$ ;

⇒ *дифференциатор*. Приняв в (1)  $Z_1 = 1/(j\omega C)$ ,  $Z_2 = R$ , получаем  $K_U = -j\omega CR$

или  $\dot{U}_{\max} = -j\omega CR \dot{U}_{\text{вх}}$ , или  $u_{\max}(t) = -RC \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}$ .

# Инвертирующий сумматор

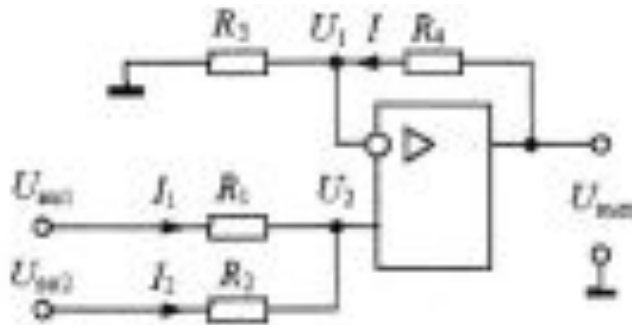


Инвертирующий сумматор (рис. 7). На основании соотношения  $I_1 + I_2 = I$  получаем выражение выходного напряжения для сумматора напряжений с весовыми коэффициентами

$$U_{вых} = -\left(\frac{R}{R_1}U_{вх1} + \frac{R}{R_2}U_{вх2}\right), \text{ которое при } R_1 = R_2 = R \text{ принимает вид}$$

$$U_{вых} = -(U_{вх1} + U_{вх2}).$$

# Неинвертирующий сумматор



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

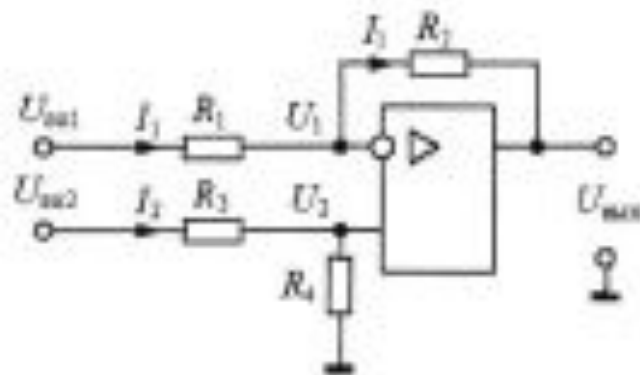
$$(3) \quad \frac{U_{вх1} - U_2}{R_1} = \frac{U_2 - U_{вх2}}{R_2}; \quad U_1 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{вых} = U_2,$$

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

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

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

# Вычитатель



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

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

Рис. 9. Вычитатель.

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

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

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

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

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



# 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

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

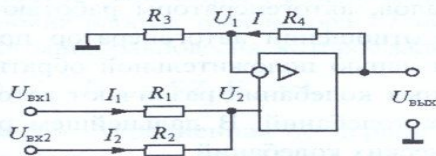


Рис. 8. Неинвертирующий сумматор

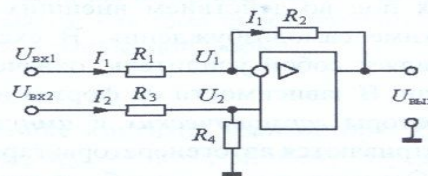


Рис. 9. Вычитатель

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

$$\dot{U}_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t \dot{U}_{\text{вх}} dt. \quad (4.29)$$

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.

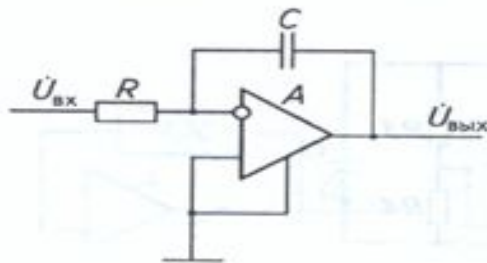


Рис. 4.52. Интегратор на ОУ

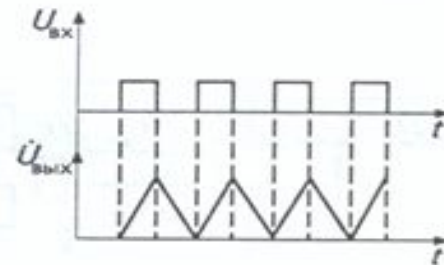


Рис. 4.53. Временные диаграммы напряжений интегратора