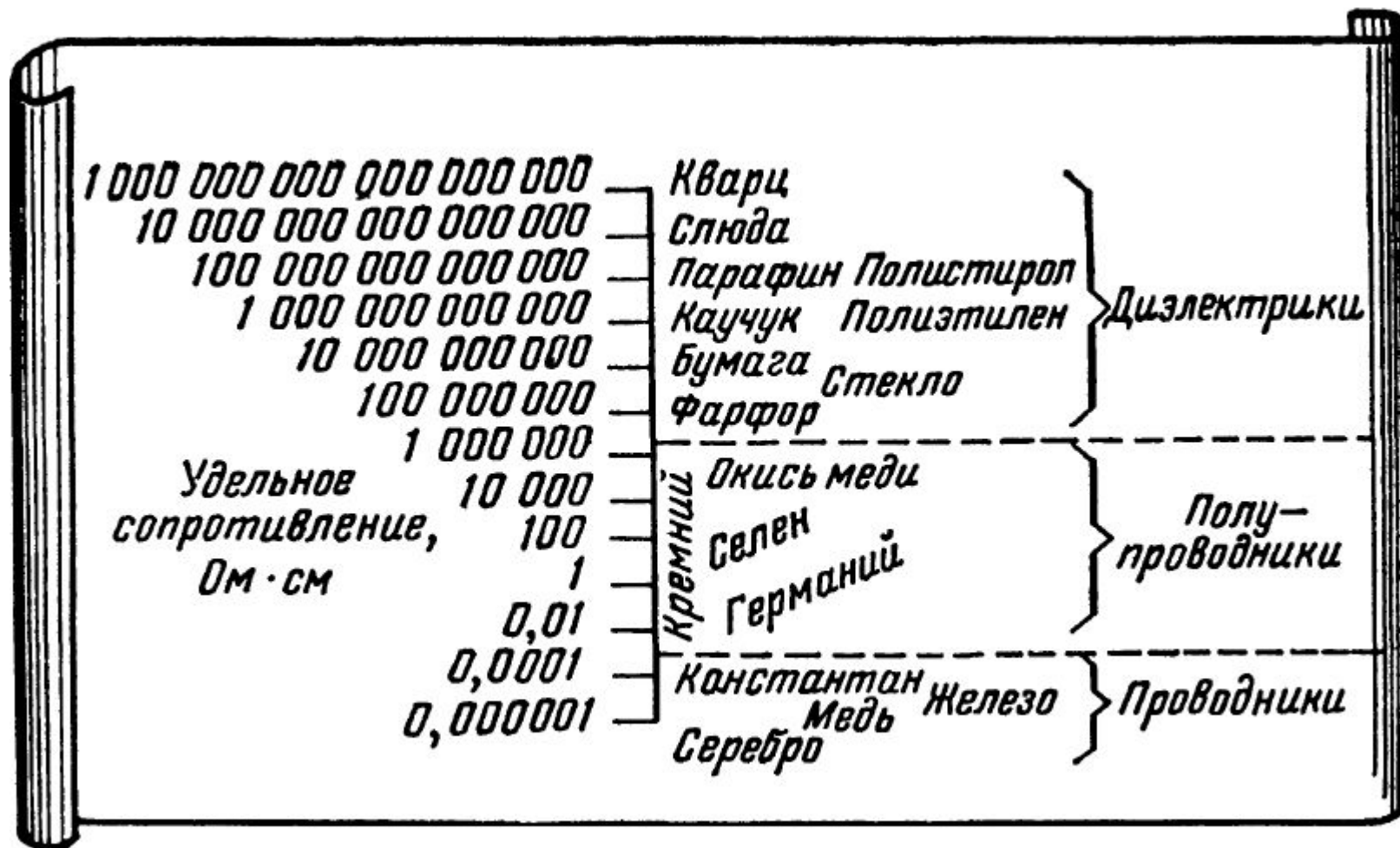
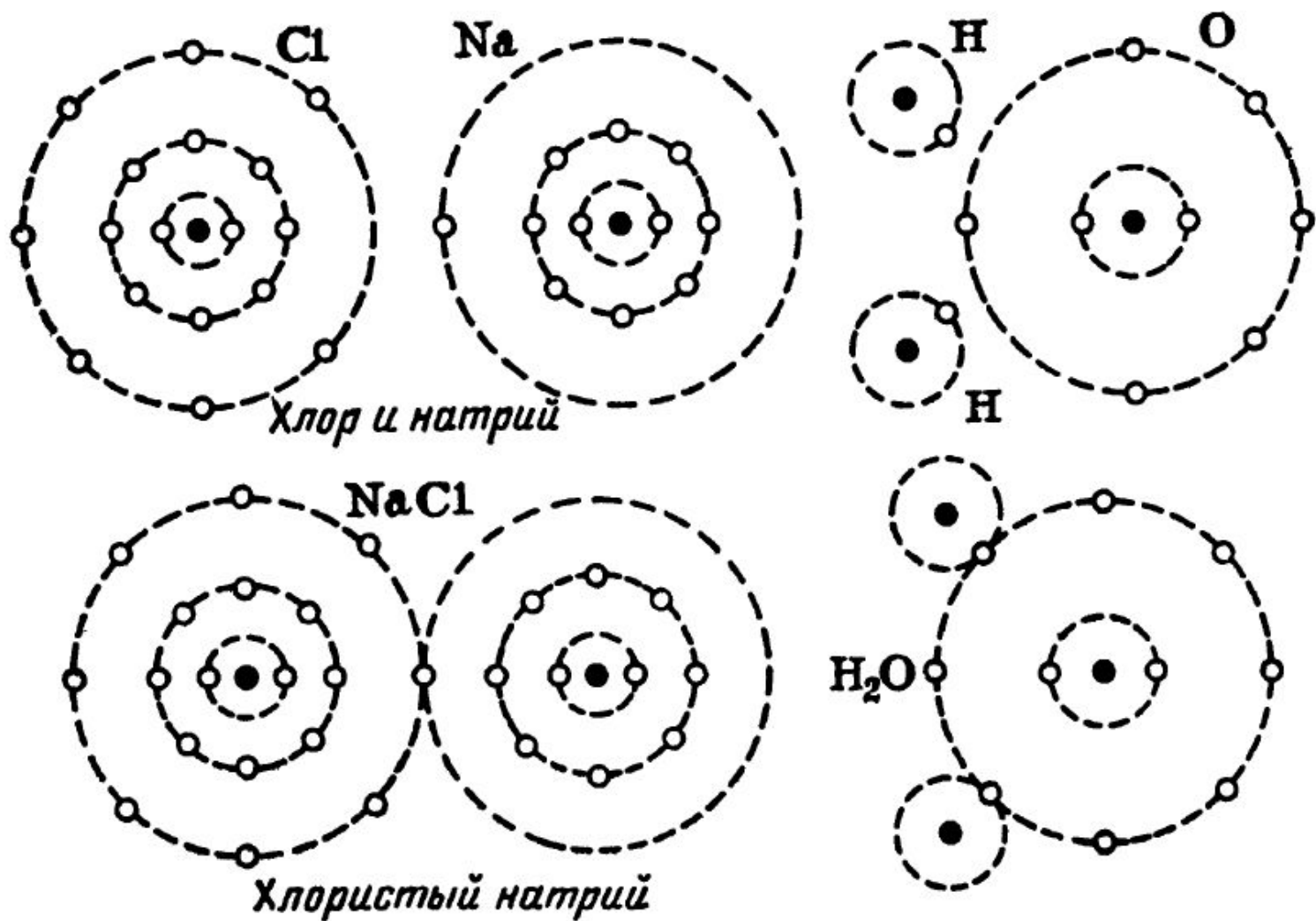


Полупроводниковые приборы

Что такое полупроводники?



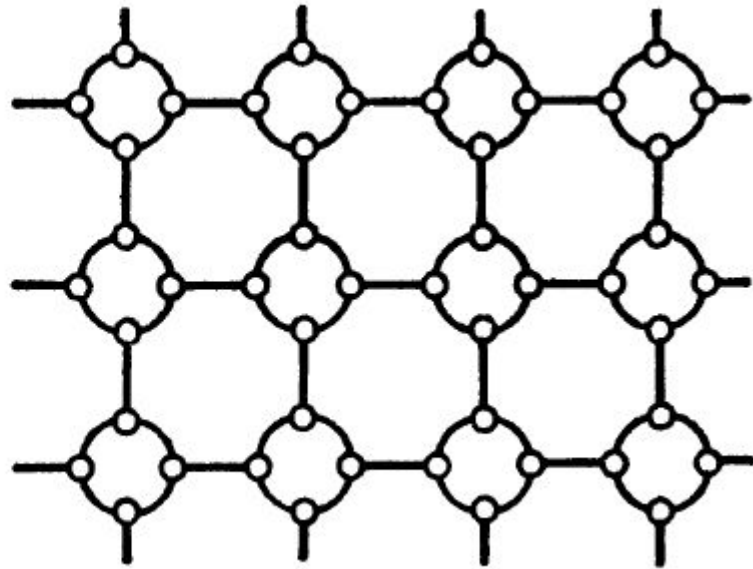
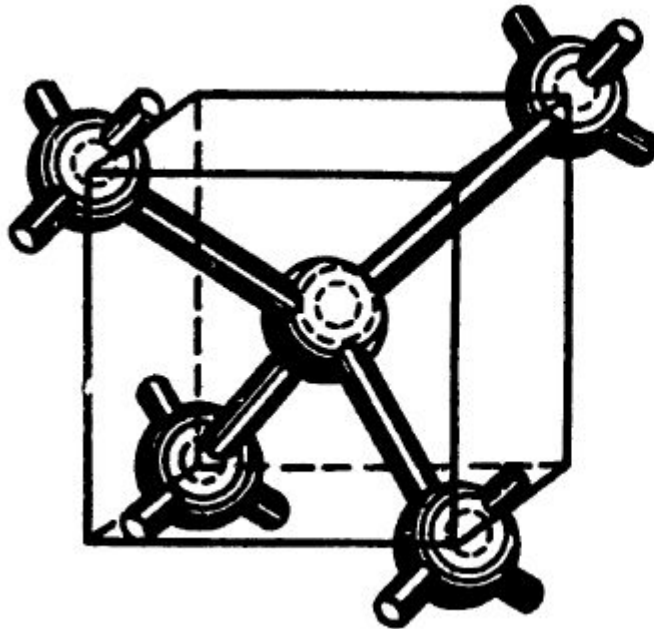
Валентность, электрическое состояние атома, ионизация, стабильность



Элементы для изготовления транзисторов

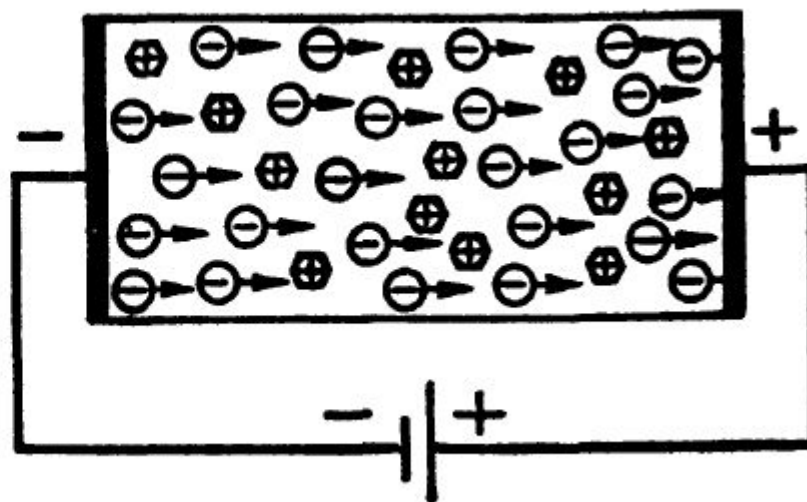
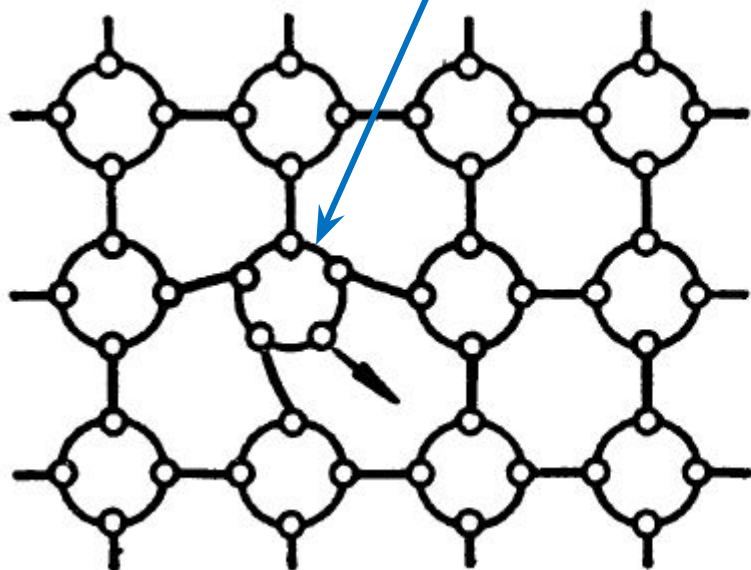
Порядковый номер атома	Название элемента	Условное обозначение	Количество электронов на каждой оболочке				
			K	L	M	N	O
13	Алюминий	Al	2	8	3		
14	Кремний	Si	2	8	4		
31	Галлий	Ga	2	8	18	3	
32	Германий	Ge	2	8	18	4	
33	Мышьяк	As	2	8	18	5	
49	Индий	In	2	8	18	18	3
51	Сурьма	Sb	2	8	18	18	5

Кристаллическая решетка кремния и германия



Полупроводник n-типа

Примеси доноры (сурьма, мышьяк)

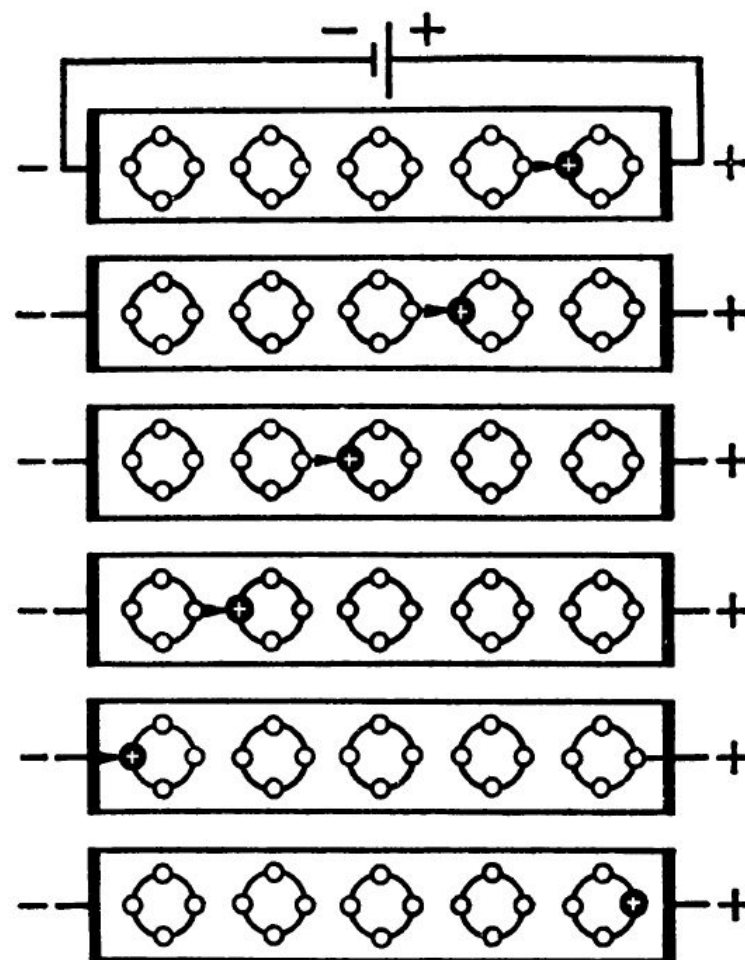
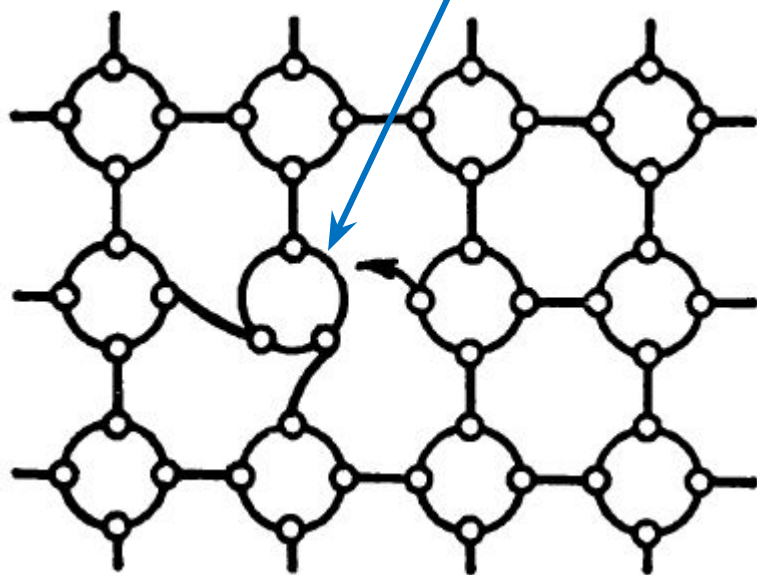


⊖ Электрон

⊕ Ионизированный донор

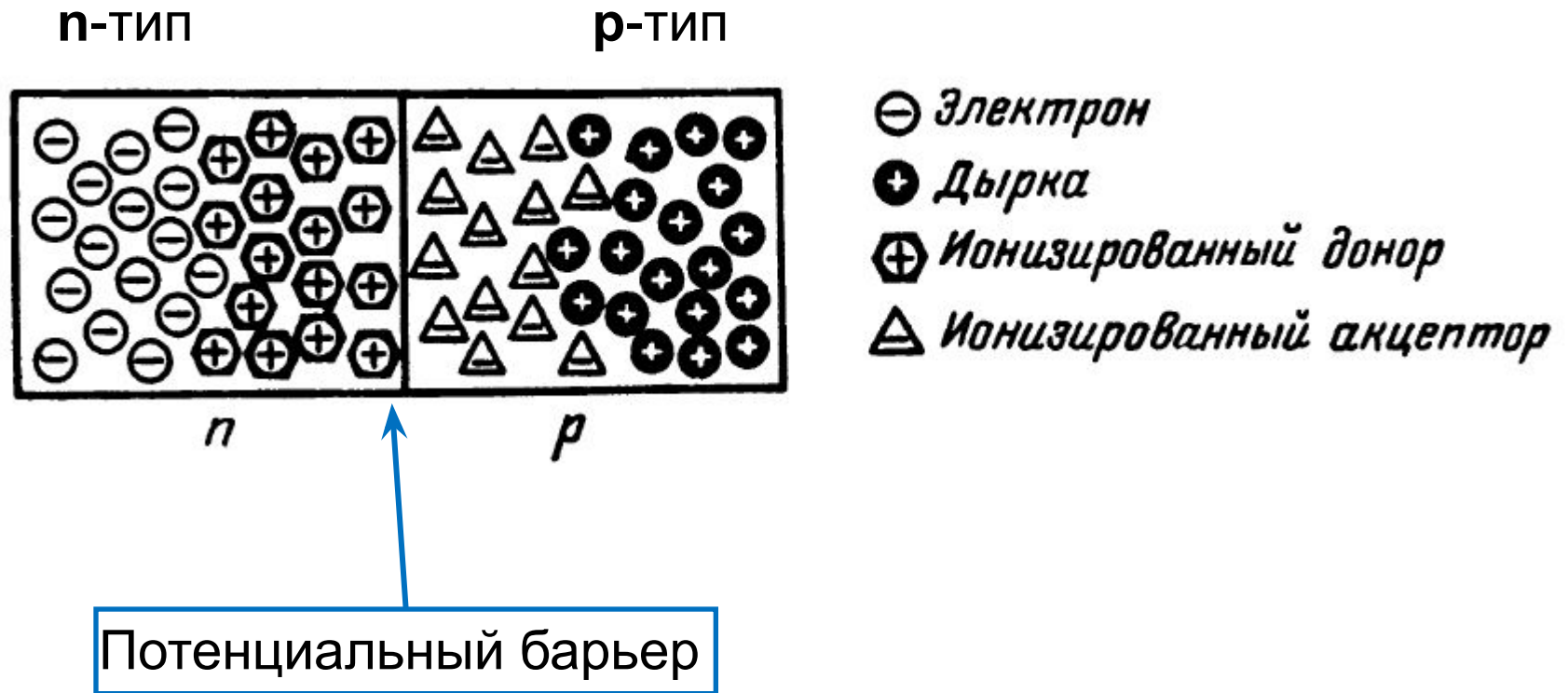
Полупроводник р-типа

Примеси акцепторы (индий, галлий)

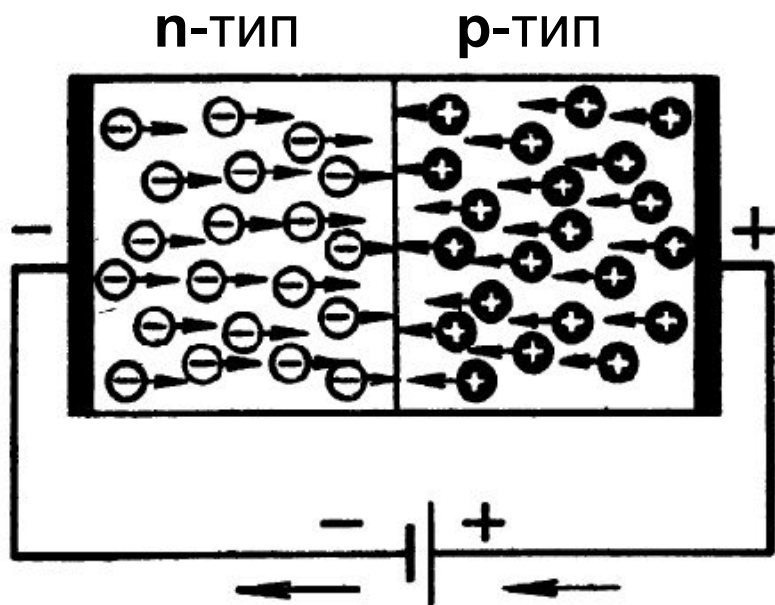


⊕ Дырка

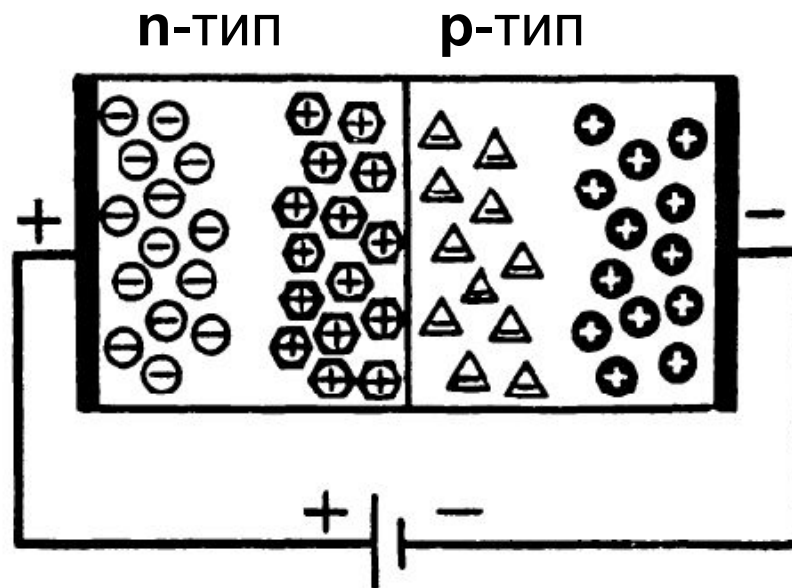
р-п переход



Подача напряжения на р-п переход



Прямое напряжение



Обратное напряжение

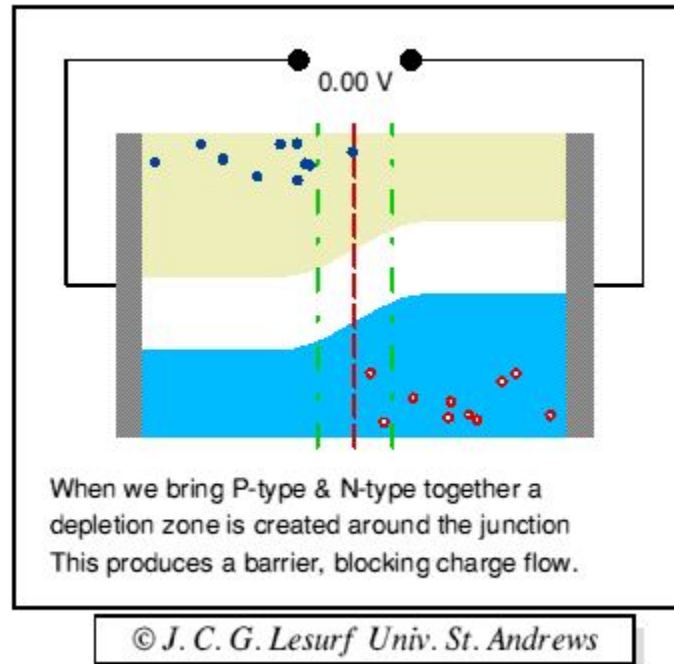
⊖ Электрон

⊕ Дырка

⊕ Ионизированный донор

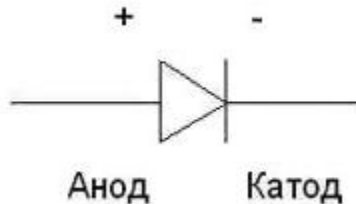
△ Ионизированный акцептор

Подача напряжения на р-n переход



ВАХ полупроводникового диода

Условное обозначение диода на схемах



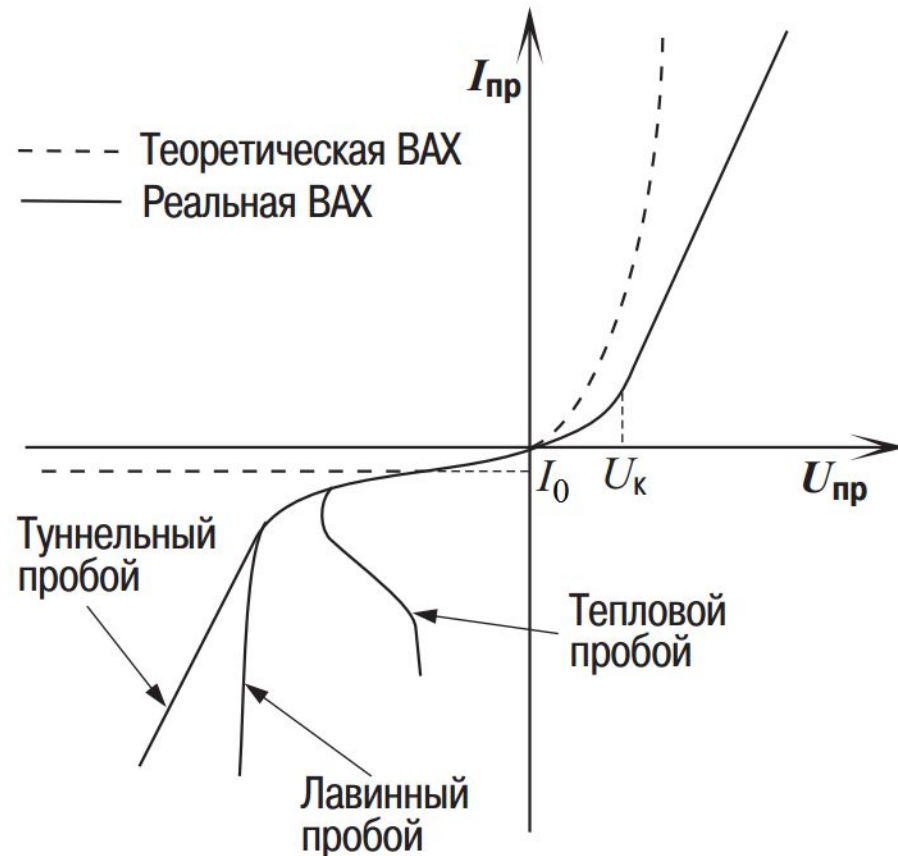
Вольт-амперная характеристика диода описывается уравнением Шокли:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\eta U_T}} - 1 \right);$$

где

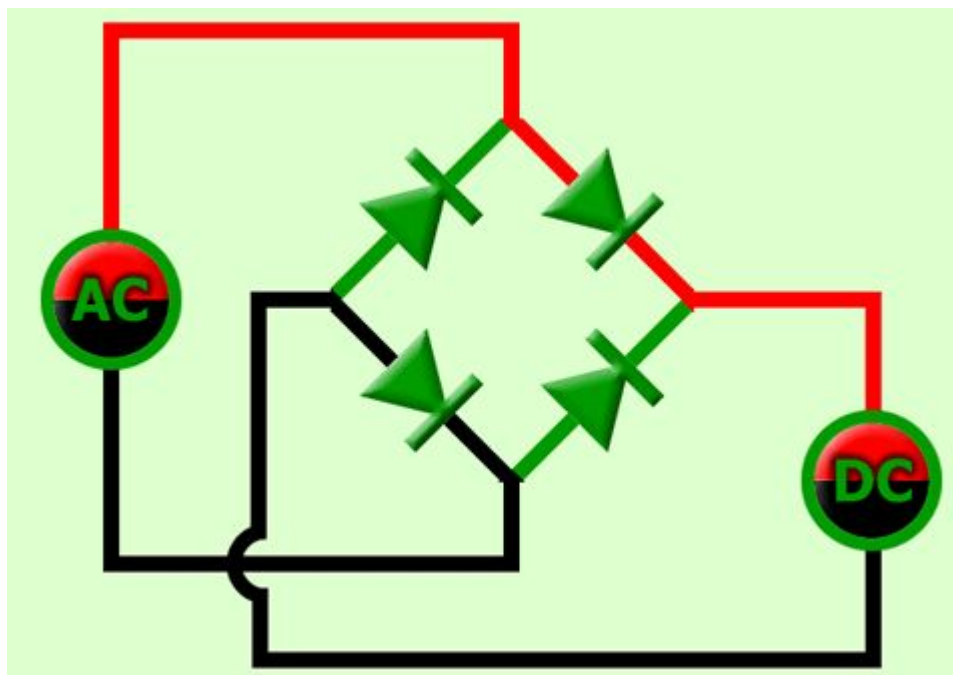
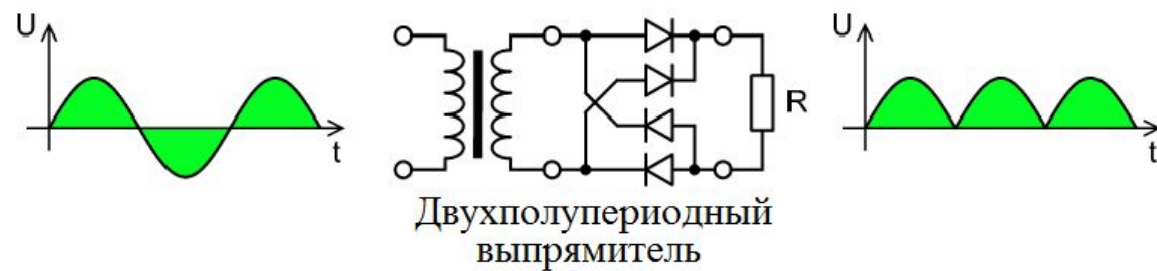
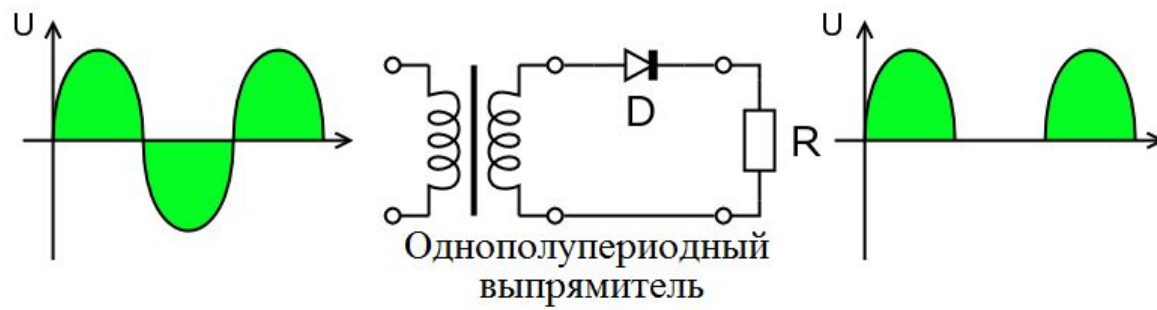
- I — ток через диод,
- U — напряжение между выводами,
- I_0 — ток насыщения,
- η — коэффициент идеальности,
- $U_T = \frac{k_B T}{q_e}$ — термическое напряжение (около 25 мВ при 300 К),
- T — абсолютная температура р—п-перехода,
- $q_e \approx 1,6 \times 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд,
- $k_B \approx 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

--- Теоретическая ВАХ
— Реальная ВАХ

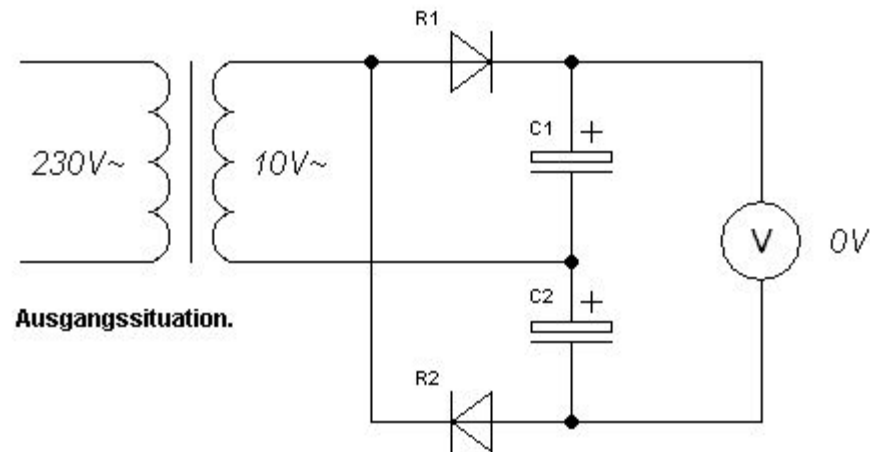
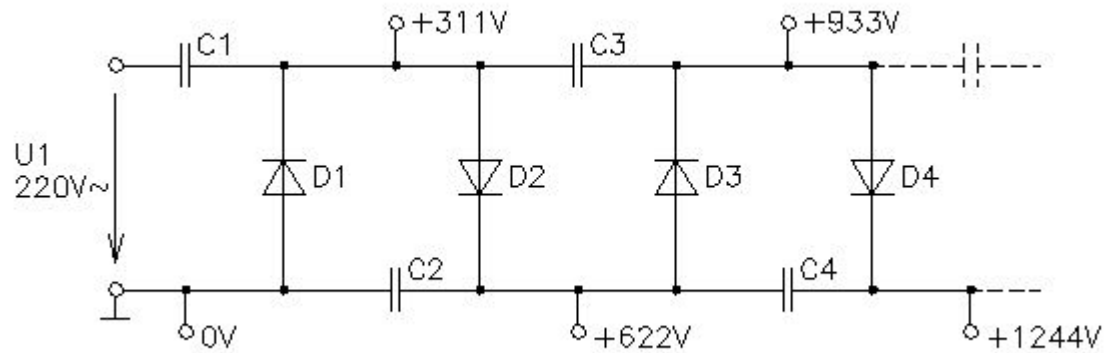


Основные характеристики полупроводникового диода

- $U_{\text{обр max}}$ — максимально допустимое постоянное обратное напряжение,
- $U_{\text{обр и max}}$ — максимально допустимое импульсное обратное напряжение,
- $I_{\text{пр ср max}}$ — максимально допустимый средний прямой ток,
- $I_{\text{пр и max}}$ — максимально допустимый импульсный прямой ток,
- $t_{\text{вос}}$ — время восстановления,
- P_{max} — максимальная рассеиваемая мощность,
- $C_{\text{д}}$ — ёмкость перехода,
- f_{max} — максимально допустимая частота переключения,
- $U_{\text{пр}}$ при $I_{\text{пр}}$ — постоянное прямое напряжение диода при указанном токе,
- $I_{\text{обр}}$ — постоянный обратный ток.



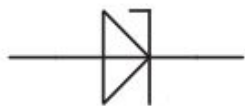
Умножитель напряжения



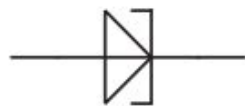
Другие типы полупроводниковых диодов



Общее обозначение (диоды
выпрямительные, универсальные,
импульсные и т.п.)



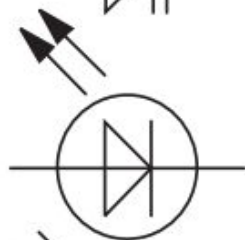
Стабилитрон



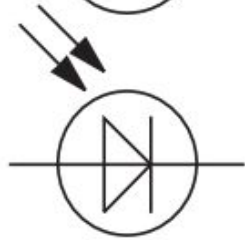
Диод туннельный



Варикап



Светодиод



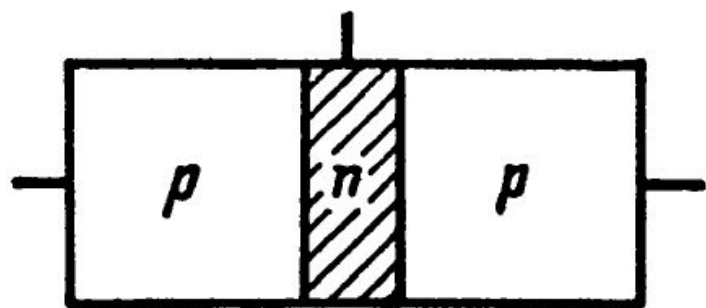
Фотодиод



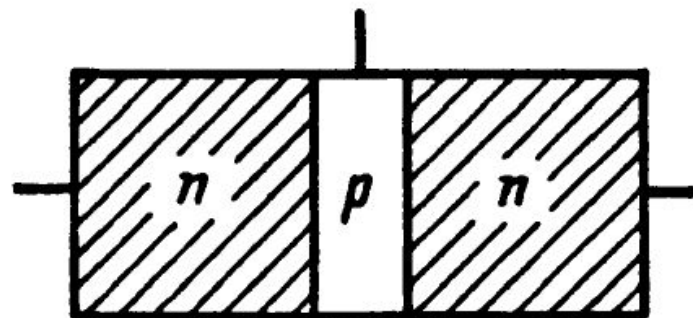
Диод Шоттки



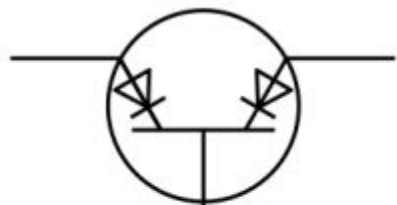
Биполярный транзистор



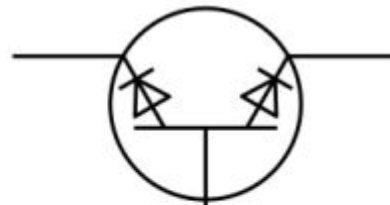
Эмиттер база Коллектор



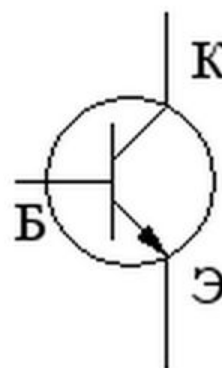
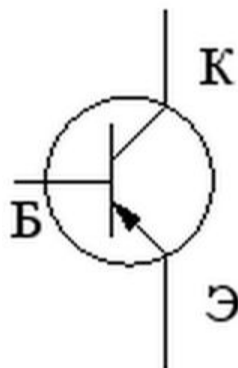
Эмиттер база Коллектор



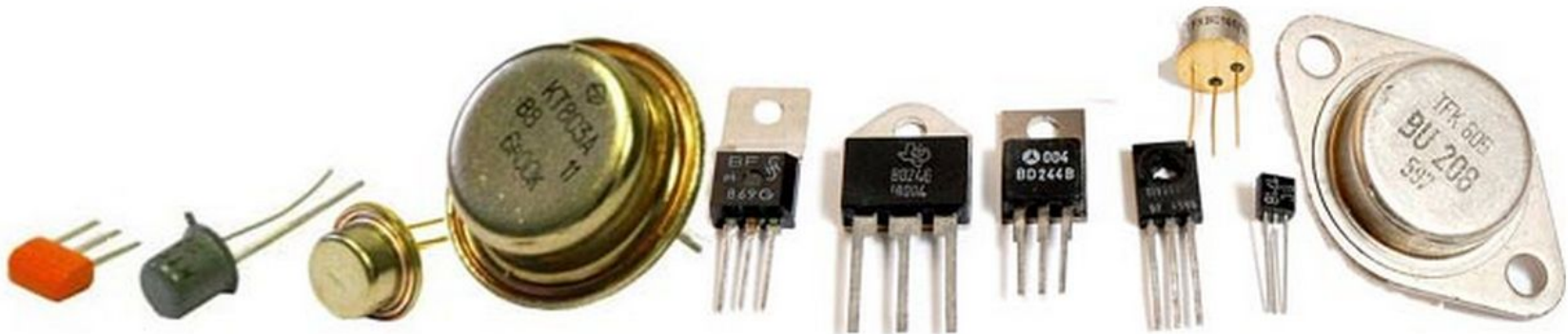
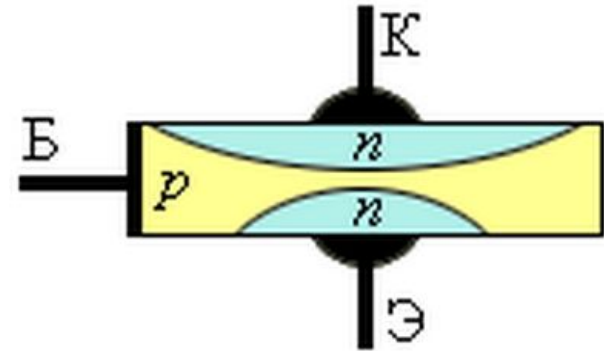
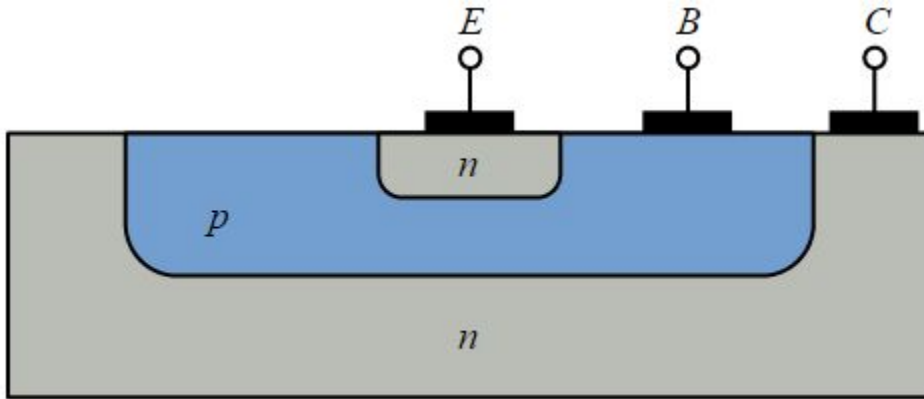
$p - n - p$



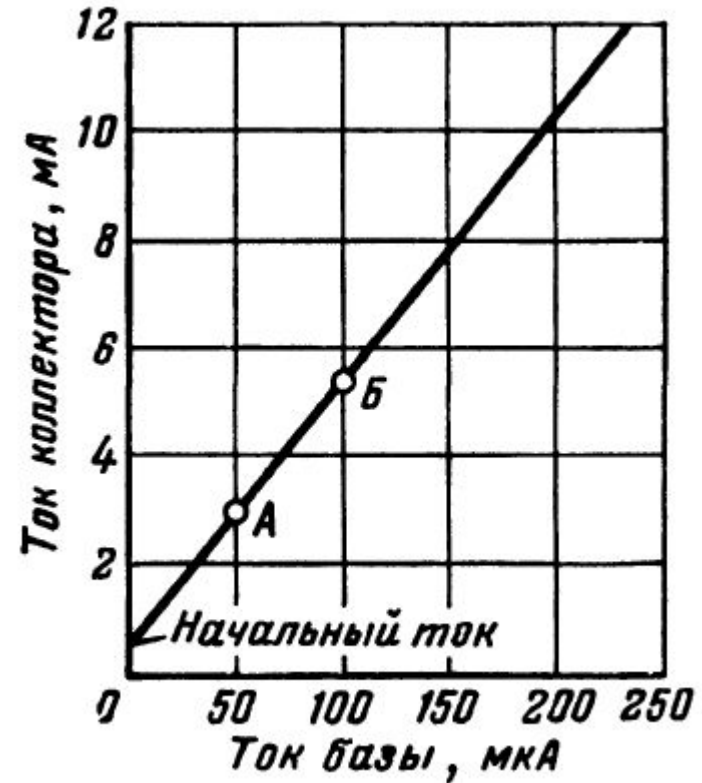
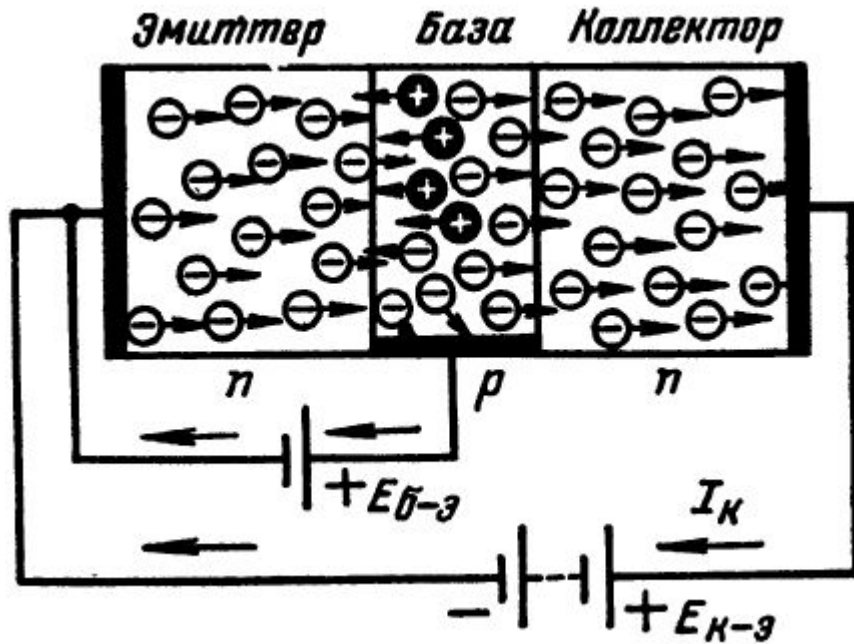
$n - p - n$



Реальная структура биполярного транзистора



Транзисторный эффект



Статический коэффициент передачи тока $h_{21э} (\beta) = 50$

Принцип работы транзистора

1. Эмиттер должен иметь **более положительный потенциал**, чем коллектор (для n-p-n-транзистора потенциал коллектора должен быть выше).
2. Цепи база – эмиттер и база – коллектор работают как диоды. Обычно **диод база – коллектор открыт**, а диод база – эмиттер смещён в обратном направлении, то есть приложенное напряжение препятствует протеканию через него тока.
3. Каждый характеризуется максимальными **значениями токов и напряжений**. В случае превышения значений транзистор выходит из строя.
4. В случае **соблюдений правил 1 – 3** ток протекающий через коллектор I_K прямо пропорционален току базы I_B и соблюдается следующее соотношение:

$$I_K = I_B * h_{21e}$$

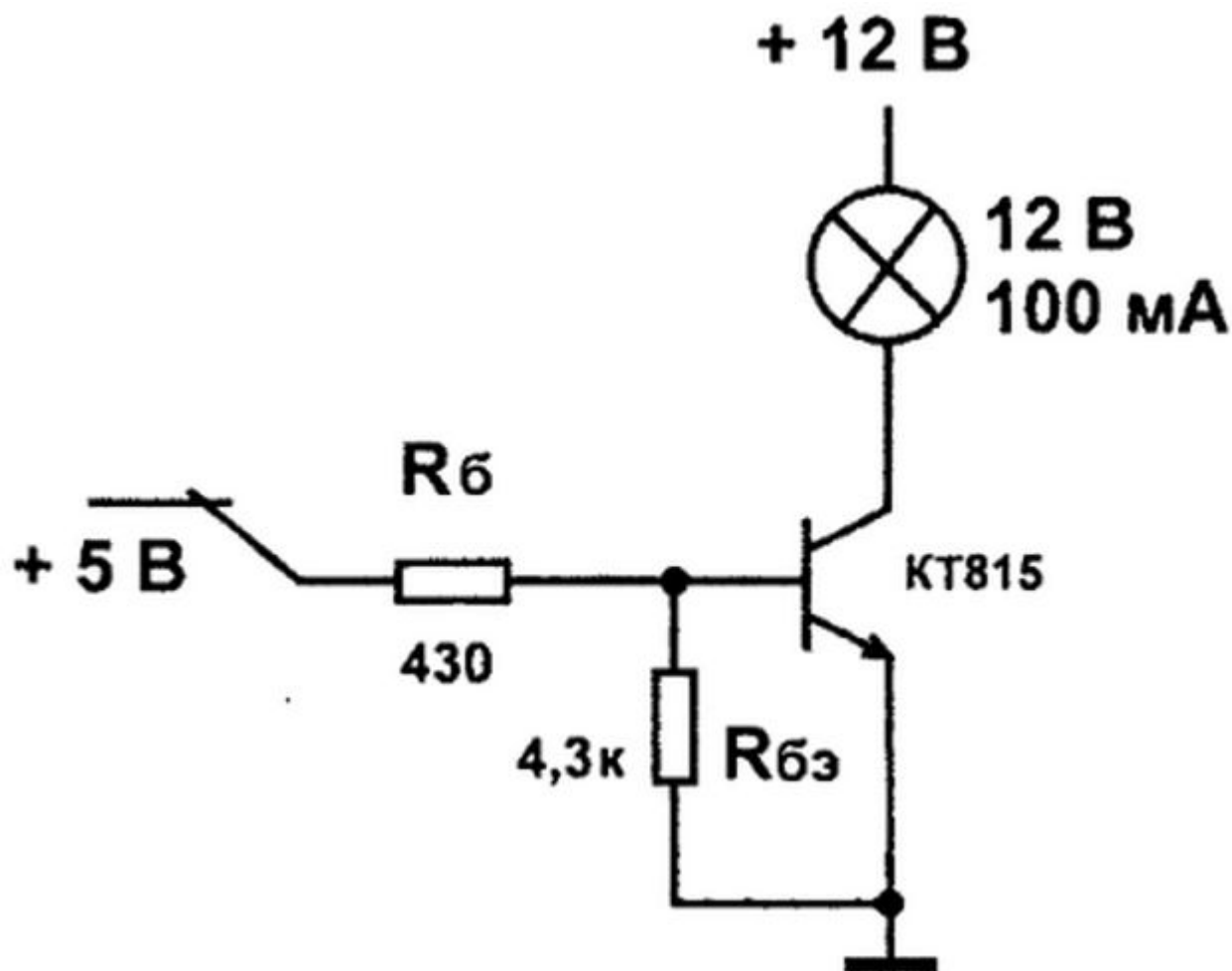
данное правило определяет основное свойство транзистора: **небольшой ток базы** управляет большим током коллектора.

Из правила 2 следует, что между базой и эмиттером напряжение **не должно превышать 0,6...0,8 В** (падение напряжения на диоде), иначе возникает очень большой ток.

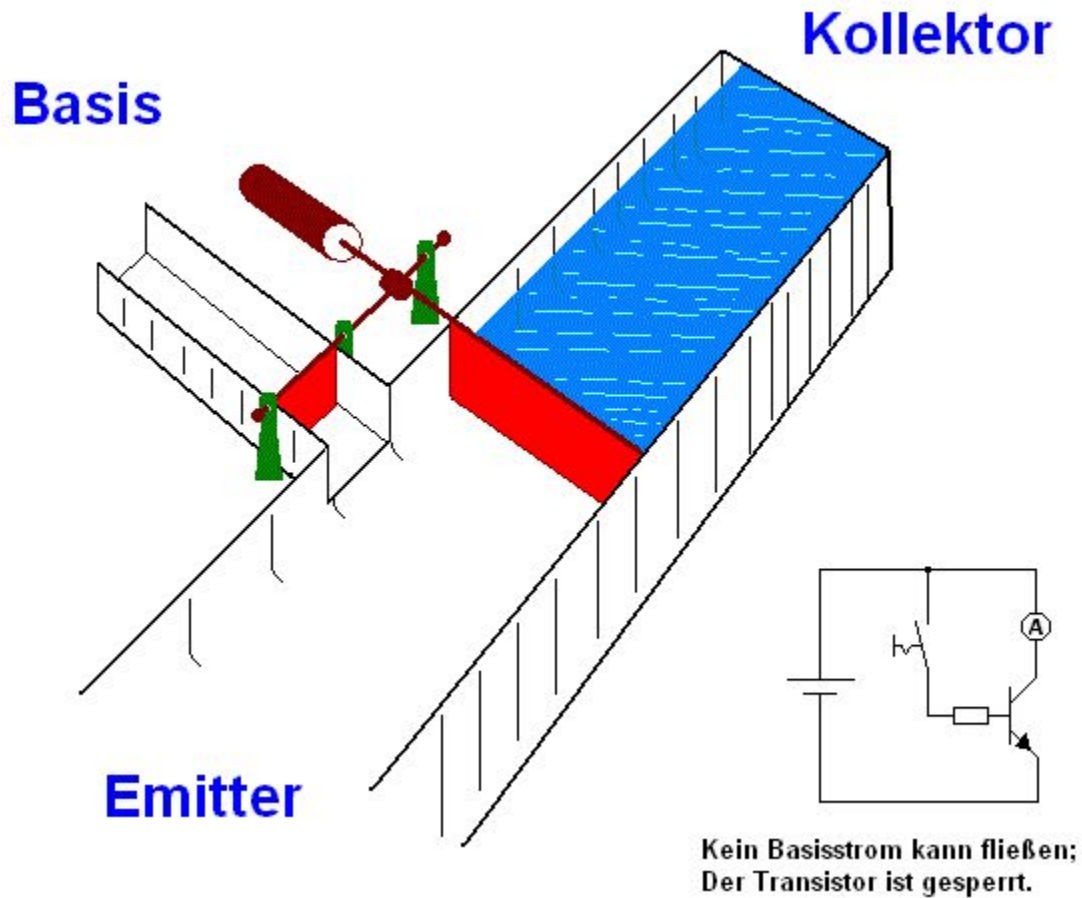
Режимы работы биполярного транзистора

- **Режим отсечки:** ток на базовом выводе отсутствует и промежуток коллектор – эмиттер представляет собой очень высокое сопротивление, а ток через коллектор пренебрежимо мал (находится в пределах тока утечки диода).
- **Режим насыщения:** на базу поступает значительный ток, а напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ} = 0,6 \dots 0,7$ В (напряжение падения на р-п-переходе). Соответственно между коллектором и эмиттером небольшое сопротивление.
- **Режим усиления:** представляет собой промежуточное состояние, при котором значения токов и напряжений на транзисторе могут варьироваться от режима отсечки к режиму насыщения.

Ключевой режим работы транзистора



Ключевой режим работы транзистора



Ключевой режим работы транзистора

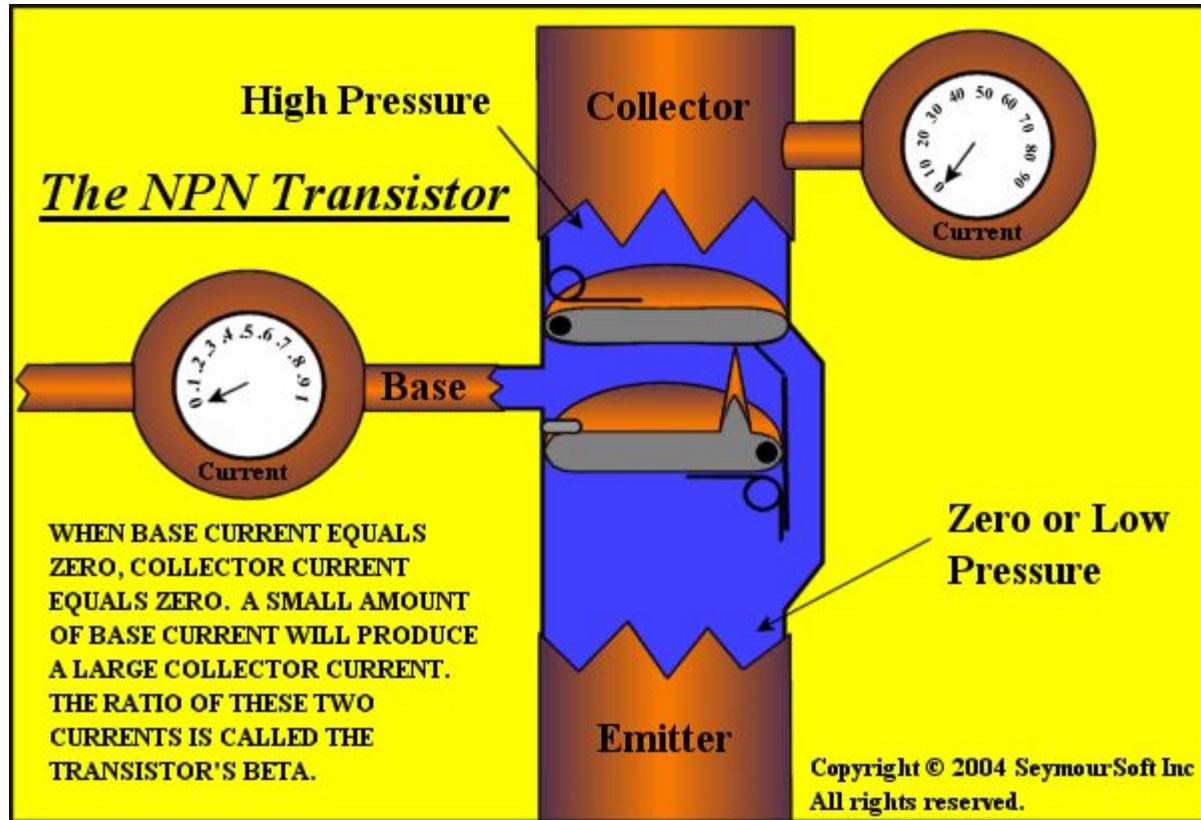
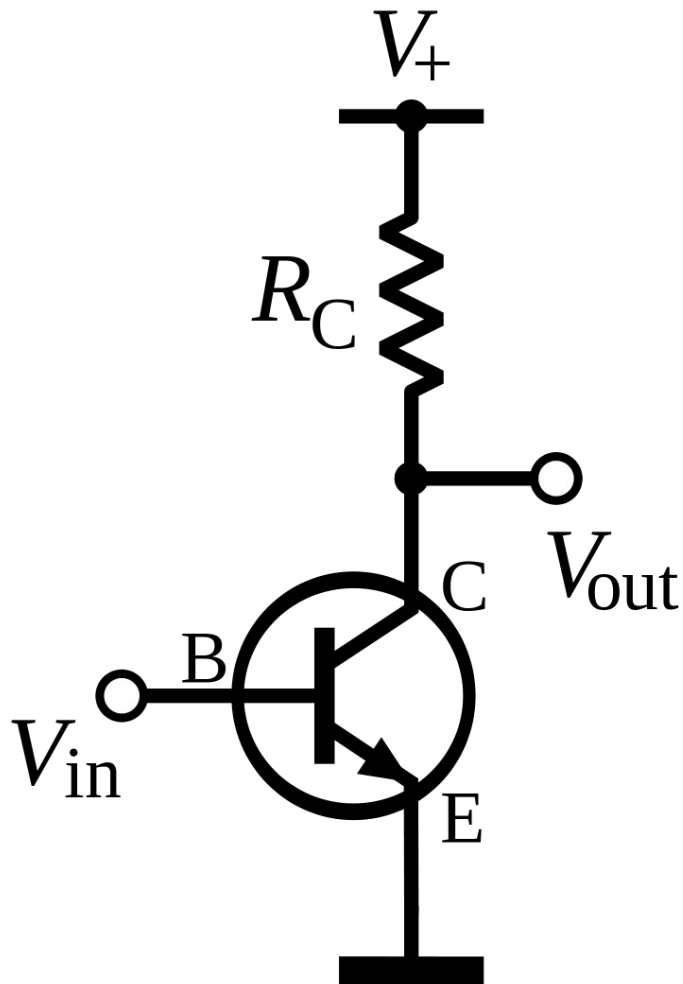


Схема включения биполярного транзистора с общим эмиттером



Достоинства:

Большой коэффициент усиления по току

Большой коэффициент усиления по напряжению

Наибольшее усиление мощности

Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного

Недостатки:

Худшие температурные и частотные свойства по сравнению со схемой с общей базой.

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}} \quad I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Б}} \quad U_{\text{ВХ}} = U_{\text{БЭ}} \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{КЭ}}$$

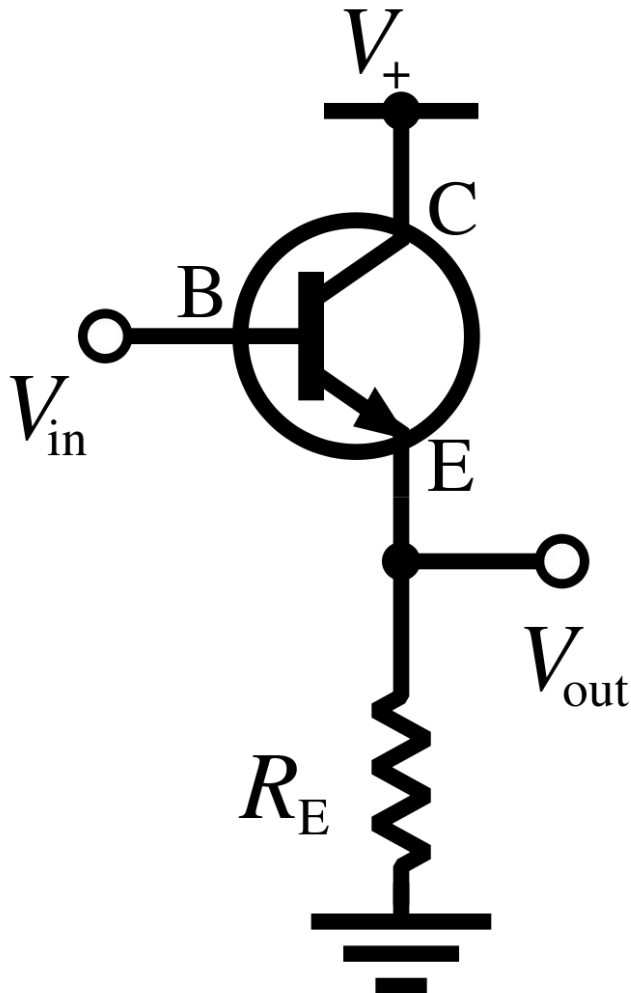
Коэффициент усиления по току:

$$I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}} = I_{\text{К}} / I_{\text{Б}} = \beta \quad [\beta \gg 1].$$

Входное сопротивление:

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}} = U_{\text{БЭ}} / I_{\text{Б}}.$$

Схема включения биполярного транзистора с общим коллектором



Достоинства:

Большое входное сопротивление

Малое выходное сопротивление

Недостатки:

Коэффициент усиления по напряжению меньше 1

Схему с таким включением называют «эмиттерным повторителем»

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{Э}} \quad I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Б}} \quad U_{\text{ВХ}} = U_{\text{БК}} \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{КЭ}}$$

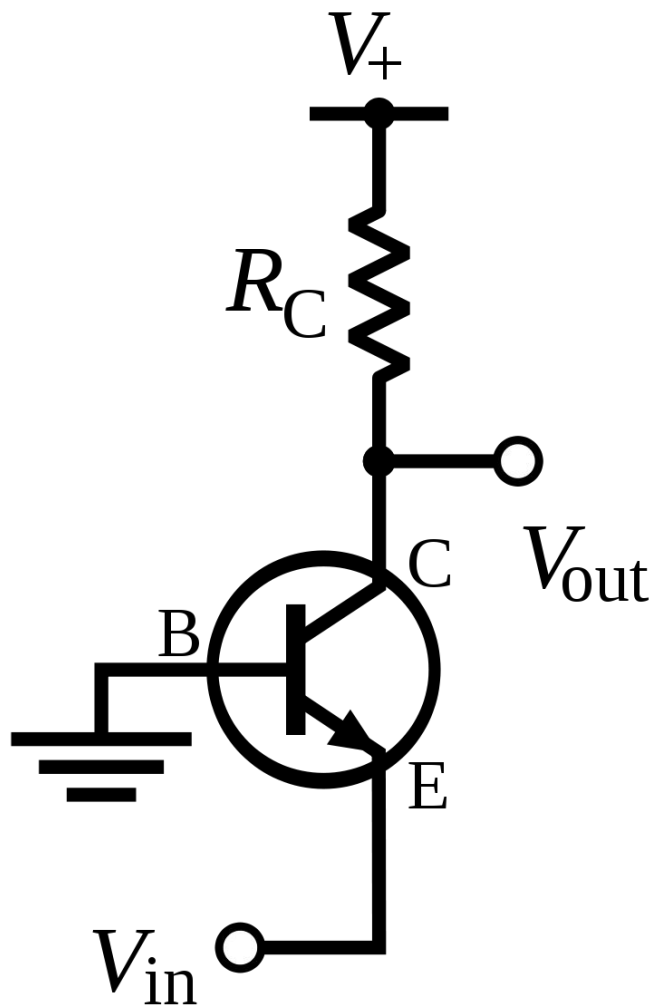
Коэффициент усиления по току:

$$I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Э}} / I_{\text{Б}} = (I_{\text{Б}} + I_{\text{К}}) / I_{\text{Б}} = \beta + 1 \quad [\beta \gg 1].$$

Входное сопротивление:

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}} = (U_{\text{БЭ}} + U_{\text{КЭ}}) / I_{\text{Б}}.$$

Схема включения биполярного транзистора с общей базой



Коэффициент усиления по току:

$$I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} = I_C / I_E = \alpha [\alpha < 1].$$

Входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}} = U_{\text{эб}} / I_E.$$

Входное сопротивление для схемы с общей базой мало и не превышает 100 Ом для маломощных транзисторов.

Достоинства:

Хорошие температурные и частотные свойства.

Высокое допустимое напряжение

Недостатки:

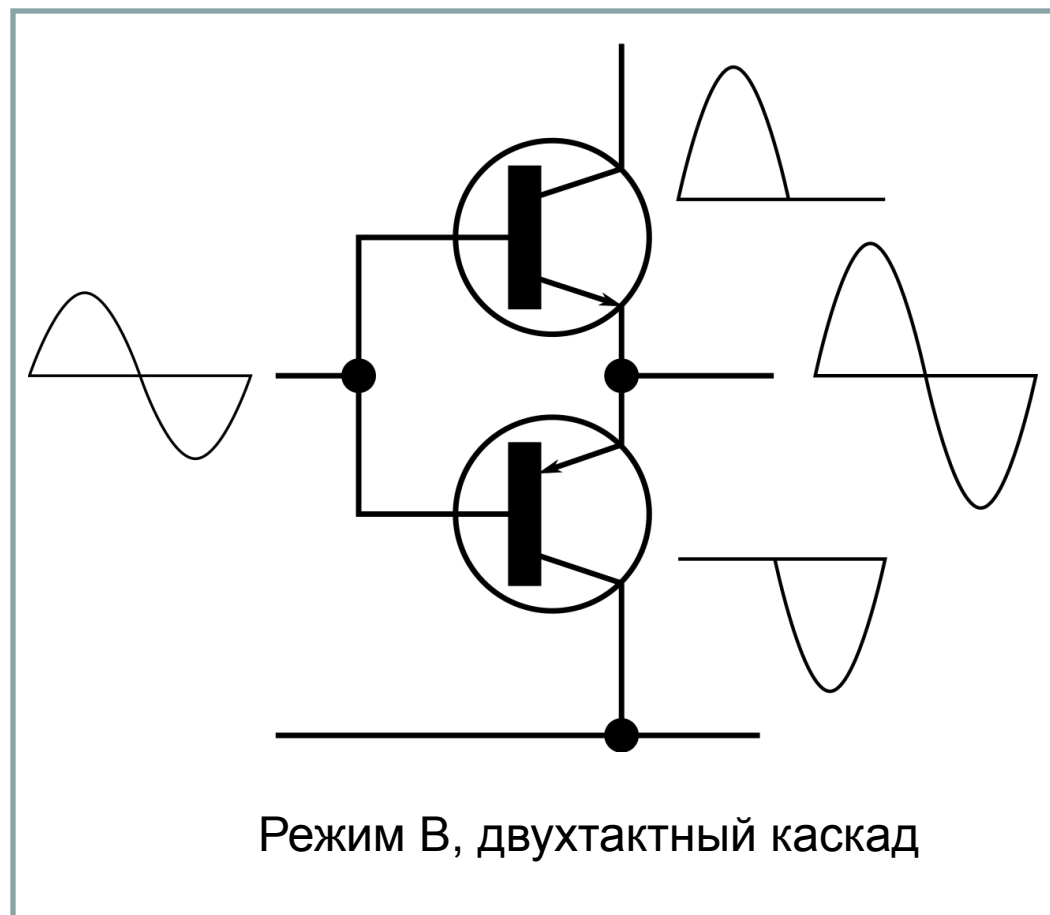
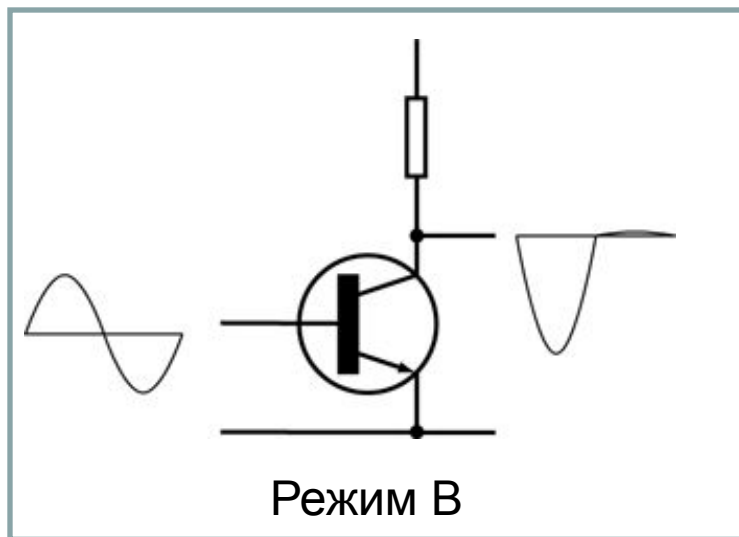
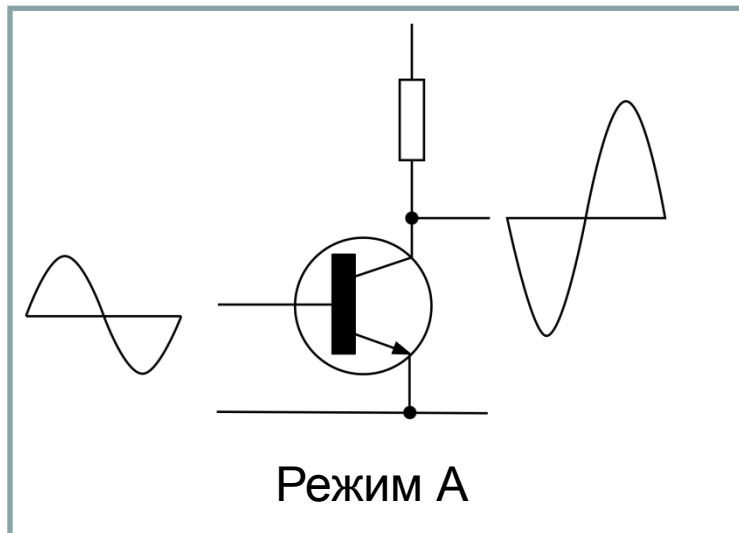
Малое усиление по току, так как $\alpha < 1$

Малое входное сопротивление

Коэффициенты усиления биполярного транзистора

Схема включения	Коэффициент усиления		
	по току	по напряжению	по мощности
С общей базой	$K_I = \frac{I_K}{I_\Delta} = \alpha$ $\alpha < 1$	$K_U = \alpha \frac{R_H}{R_{BX}}$ а так как $R_H \approx 1...10 \text{ кОм},$ $R_{BX} \approx 1...10 \text{ Ом},$ тогда $K_U \approx 100...1000$	$K_P = K_I \cdot K_U \approx$ $\approx 100...1000$
С общим коллектором	$K_I = \frac{I_\Delta}{I_B} = \beta + 1 \approx$ $\approx 10...100$	$K_U = \beta \frac{R_H}{R_{BX}} < 1$	$K_P = K_I \cdot K_U \approx$ $\approx 1 \div 10$
С общим эмиттером	$K_I = \frac{I_K}{I_B} = \beta \approx$ $\approx 10...100$	$K_U = \beta \frac{R_H}{R_{BX}}$	$K_P = K_I \cdot K_U \approx$ $\approx 1000...10000$

Классы мощных усилительных каскадов



Составные транзисторы

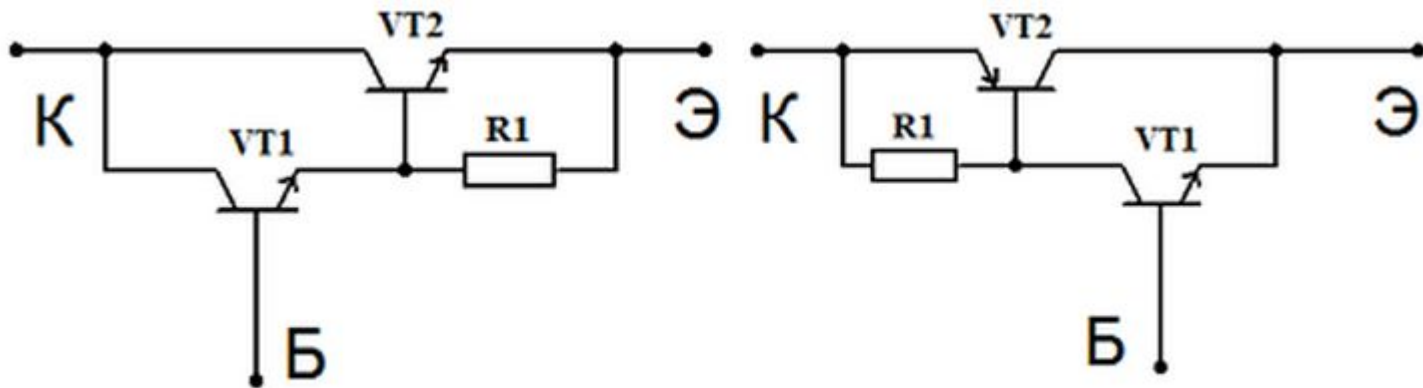


Схема Дарлингтона

Схема Шиклаи

Общий коэффициент передачи тока будет равен:

$$h_{21e}(\text{ОБЩ}) = h_{21e}(\text{VT1}) \cdot h_{21e}(\text{VT2})$$

Величину сопротивления R1 можно определить по формуле:

$$R1 \leq U_{E \min} / I_{CBO}(\text{VT1})$$

Составные транзисторы

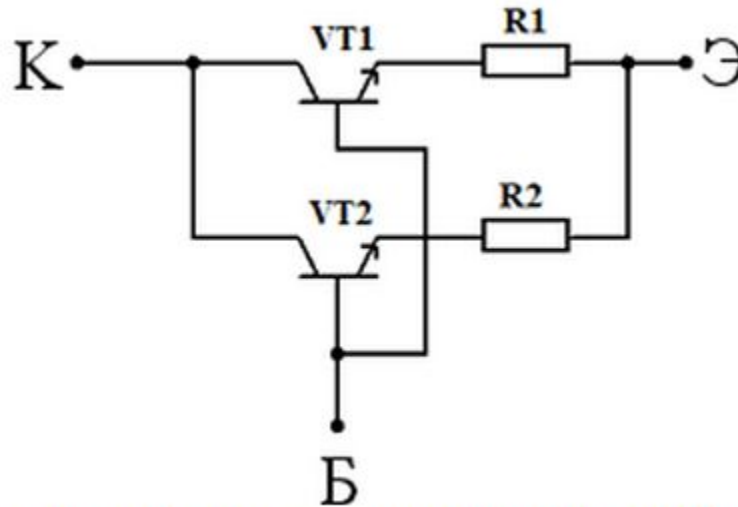


Схема параллельного включения транзисторов

Максимально допустимый ток протекающий через такой составной транзистор равен:

$$I_{Kmax}(\text{общ}) = I_{Kmax}(VT1) + I_{Kmax}(VT2)$$

Сопротивление симметрирующих резисторов R1 и R2 можно определить по формуле

$$R1 = R2 \approx 0,5n/I_K,$$

где n – число параллельно соединенных транзисторов

I_K — ток проходящий через коллектор.

Составные транзисторы

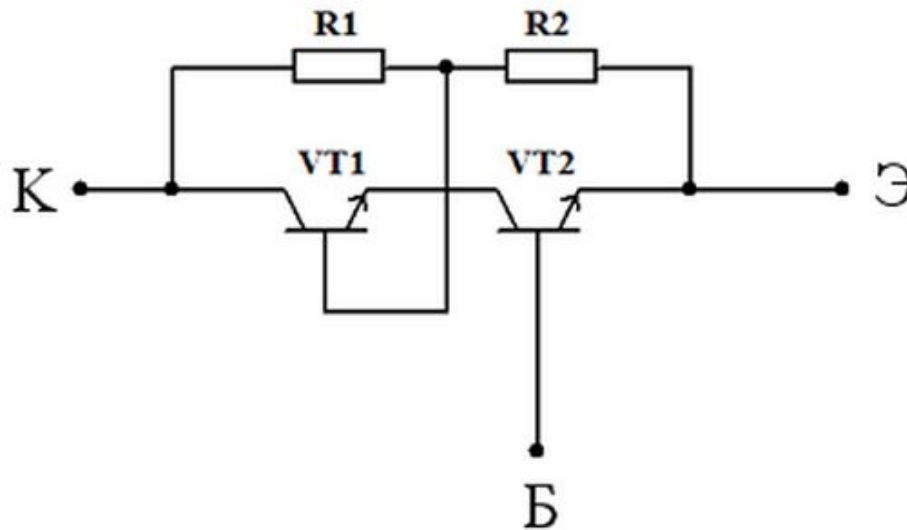


Схема последовательного включения транзисторов

Эквивалентный транзистор будет иметь следующие параметры:

$$U_{CEmax}(\text{общ}) = U_{CEmax}(VT1) + U_{CEmax}(VT2)$$

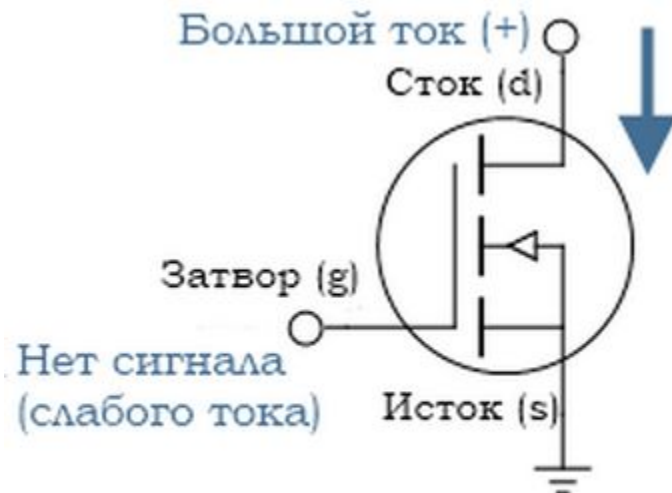
Для симметрирования напряжений, которые будут падать на переходе коллектор – эмиттер транзисторов вводят резисторы R1 и R2

сопротивление, которых можно определить по формуле

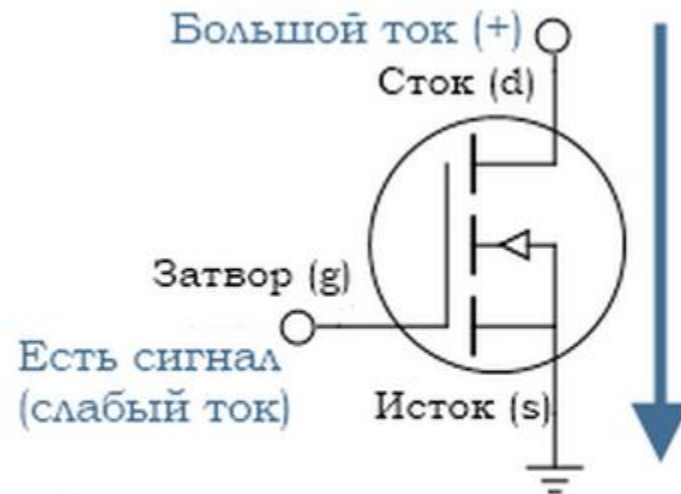
$$R1 = R2 < U_{CEmax} / 2I_B,$$

где I_B – ток базы составного регулирующего транзистора.

Полевой транзистор



Транзистор "закрыт",
большой ток заблокирован.



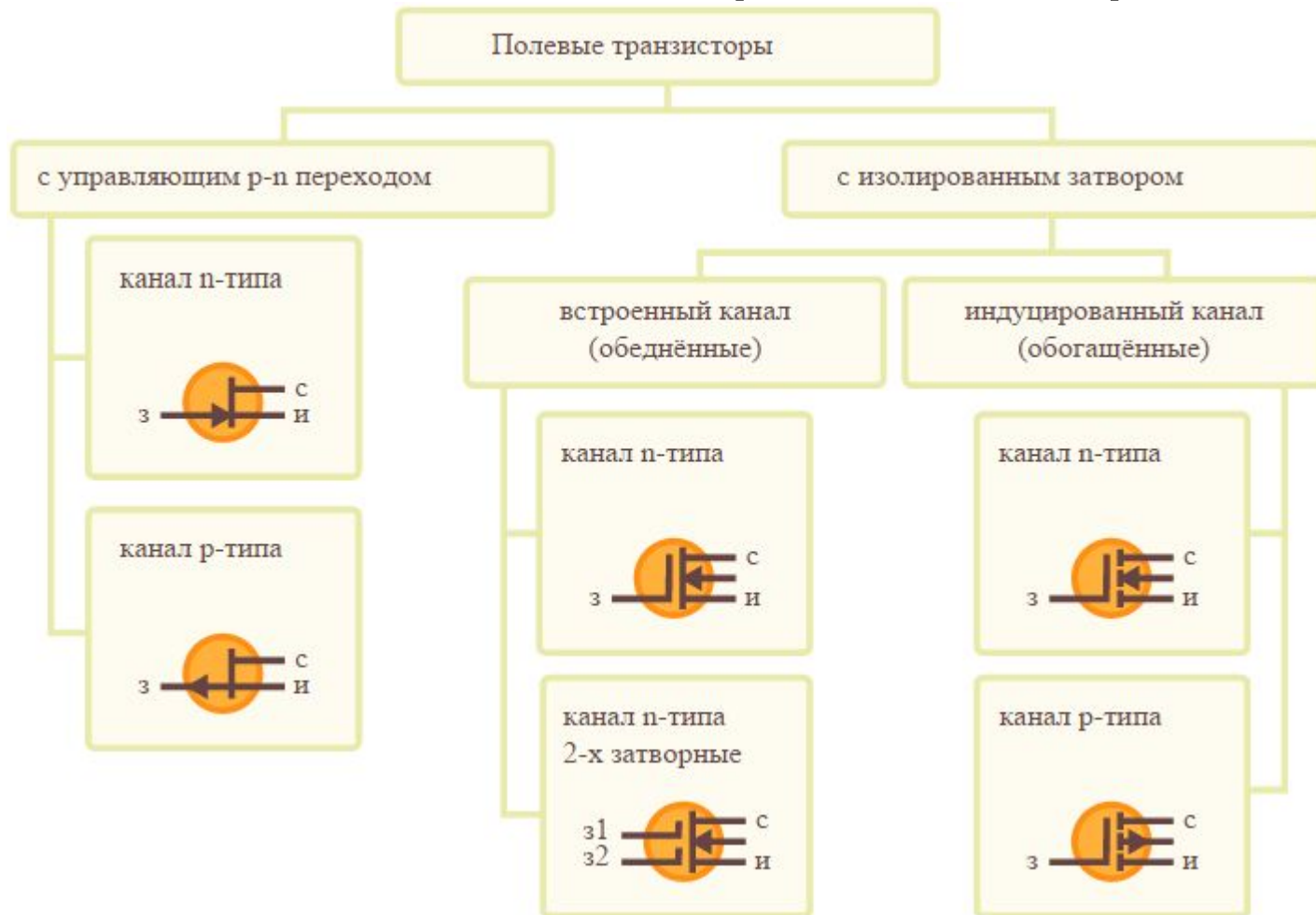
Транзистор "открыт",
большой ток течет.

исток (source) — электрод, из которого в канал входят основные носители заряда;

сток (drain) — электрод, через который из канала уходят основные носители заряда;

затвор (gate) — электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала.

Виды полевых транзисторов

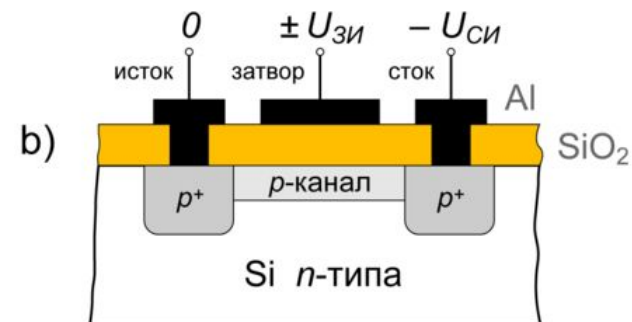
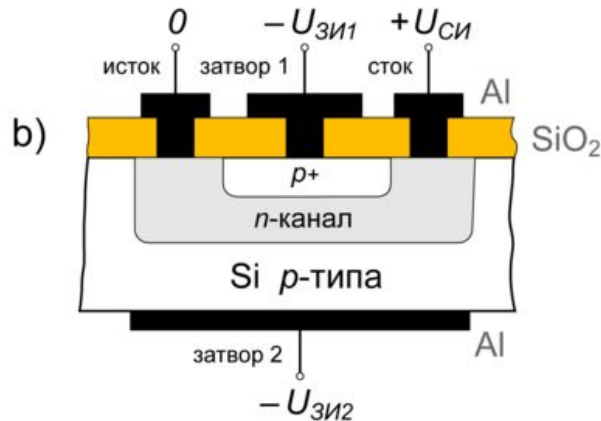
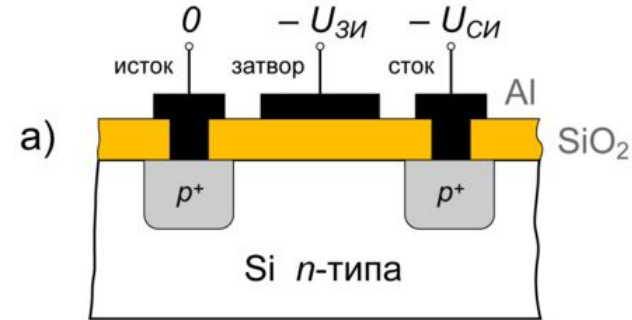
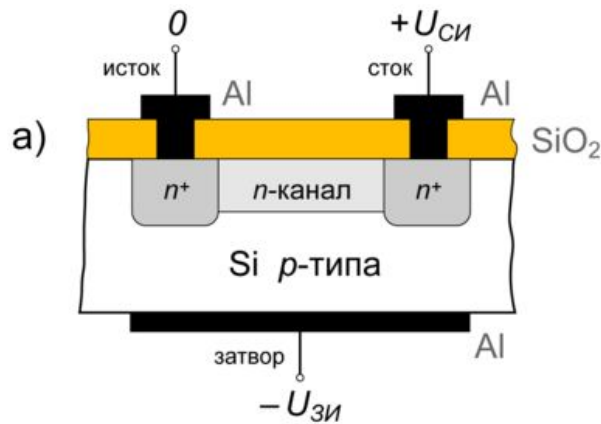


Полевые транзисторы (FET: Field-Effect-Transistors):

- с управляющим PN-переходом (JFET: Junction-FET)

- с изолированным затвором (MOSFET: Metal-Oxid-Semiconductor-FET)

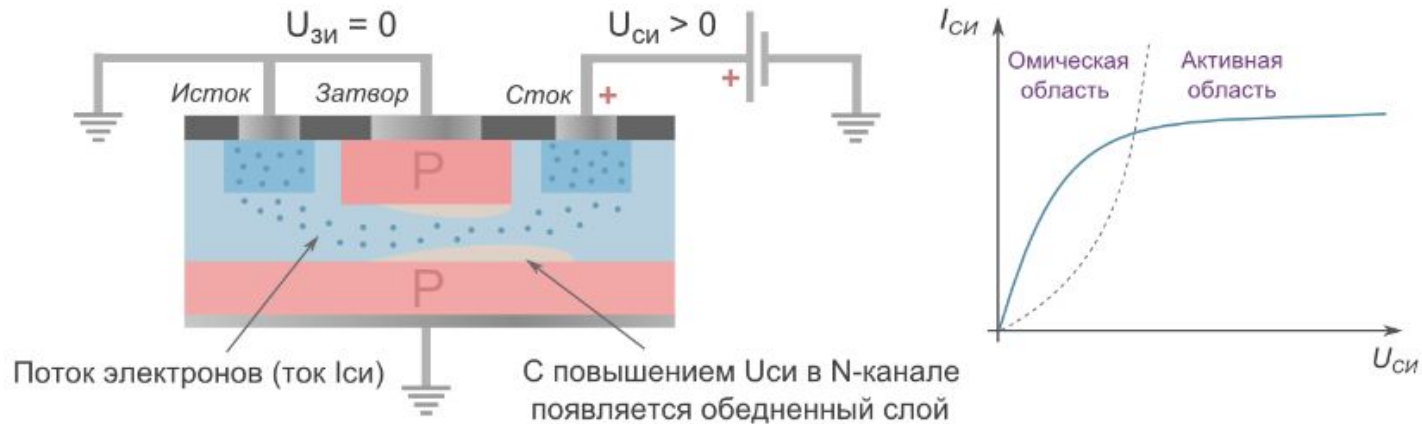
Структура полевых транзисторов



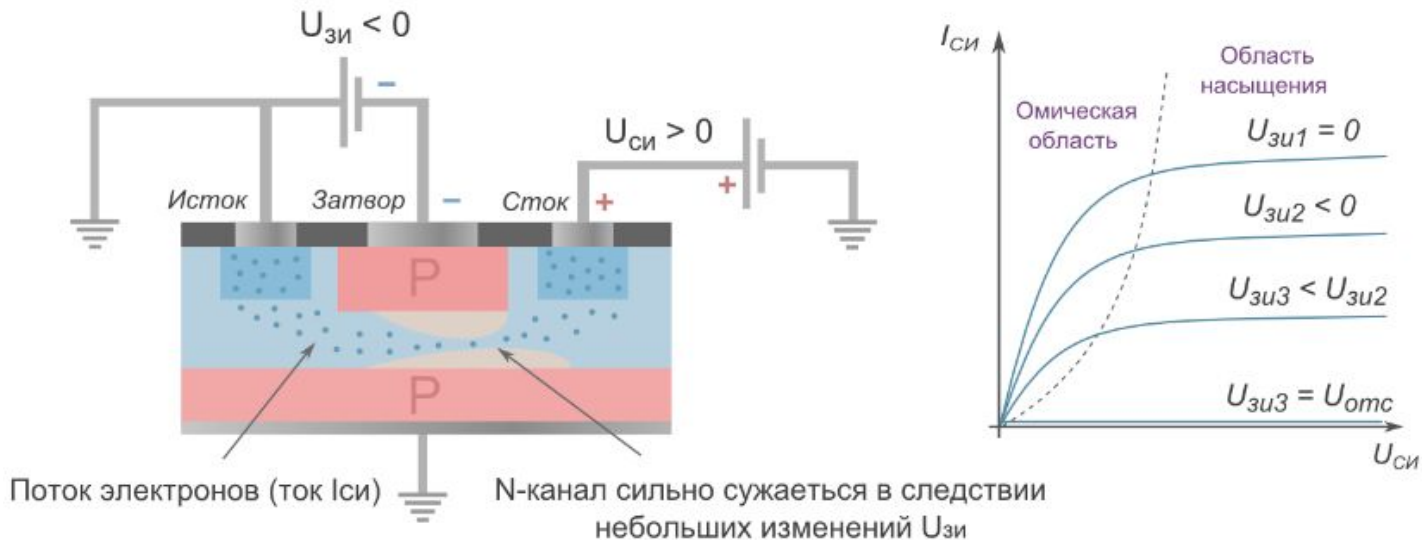
Устройство полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором
 а) с индуцированным каналом,
 б) со встроенным каналом

Принцип работы полевого транзистора

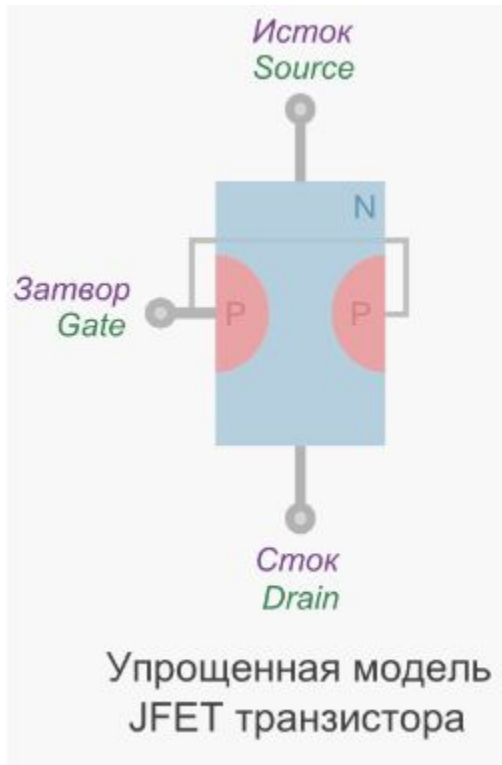


Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} = 0$



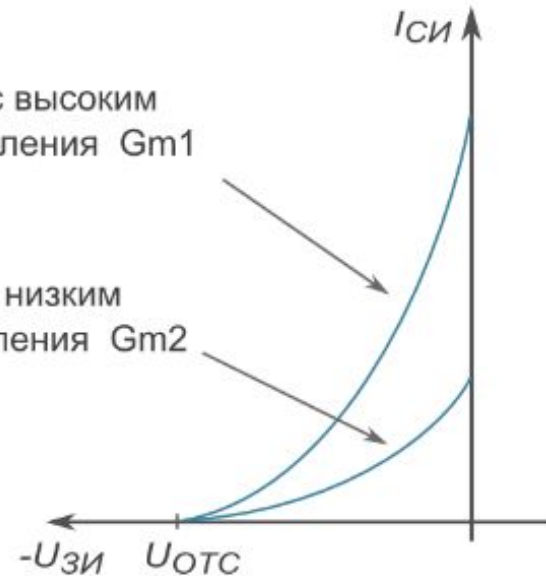
Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} < 0$

Главный параметр полевого транзистора



Транзистор JFET с высоким
коэффициентом усиления G_{m1}

Транзистор JFET с низким
коэффициентом усиления G_{m2}

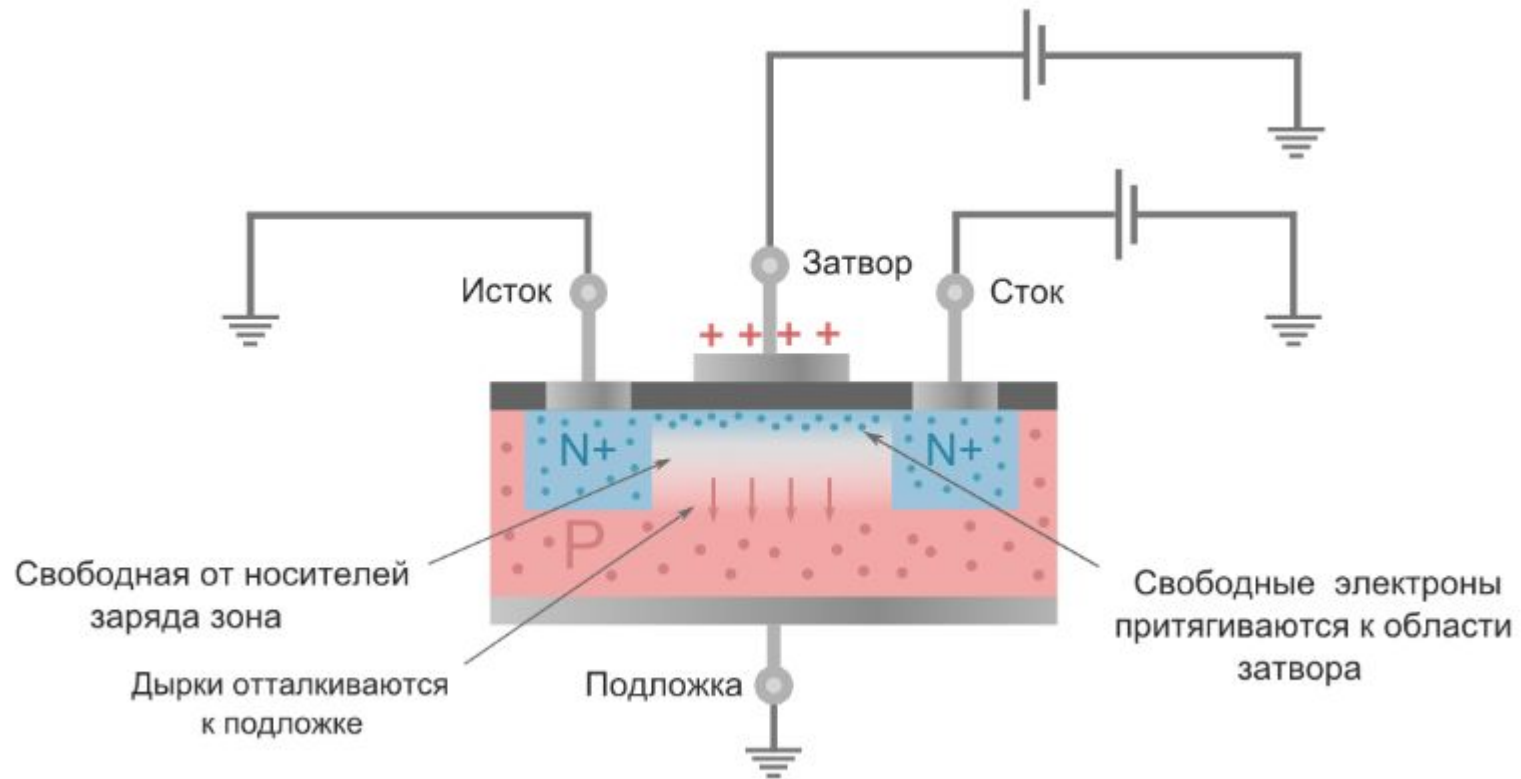


$$G_{m1} > G_{m2}$$

Зависимость тока от $I_{ДС}$ напряжения на затворе $U_{ЗИ}$
(стокозатворная характеристика)

Параметр усилительной способности JFET – это крутизна стоко-затворной характеристики (Mutual Transconductance). Обозначается g_m или S , и измеряется в mA/V (милиАмпер/Вольт).

Принцип работы МДП транзистора с индуцированным каналом



Принцип работы МДП транзистора с индуцированным каналом



График а)

Сток-выходные (выходные) характеристики
МДП-транзистора с индуцированным
каналом

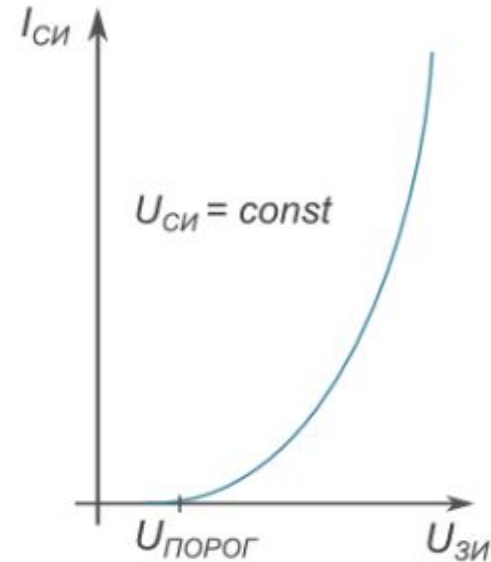


График б)

Сток-затворная характеристика
МДП-транзистора с индуцированным
каналом

Схемы включения полевого транзистора

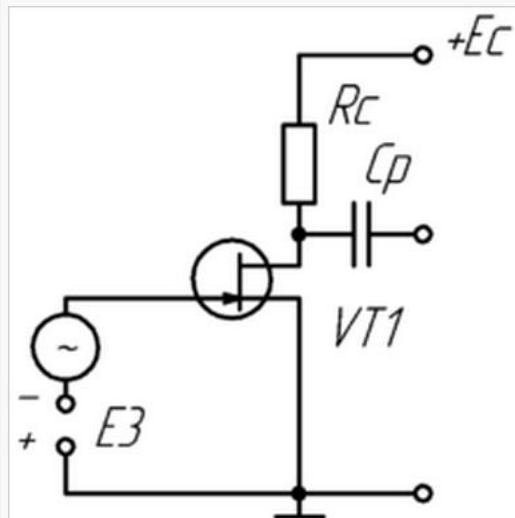


Схема включения полевого транзистора с управляющим р-п-переходом с общим истоком

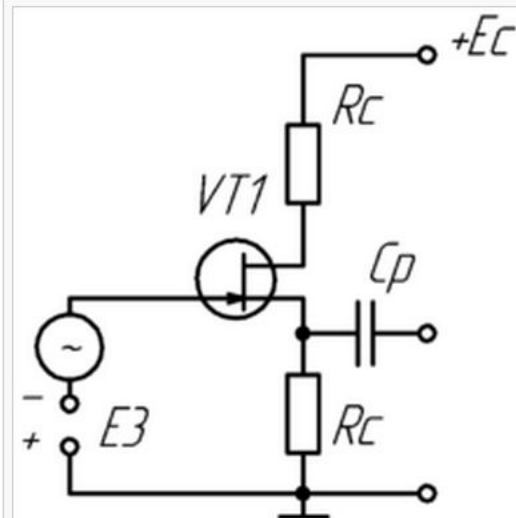


Схема включения полевого транзистора с управляющим р-п-переходом с общим стоком

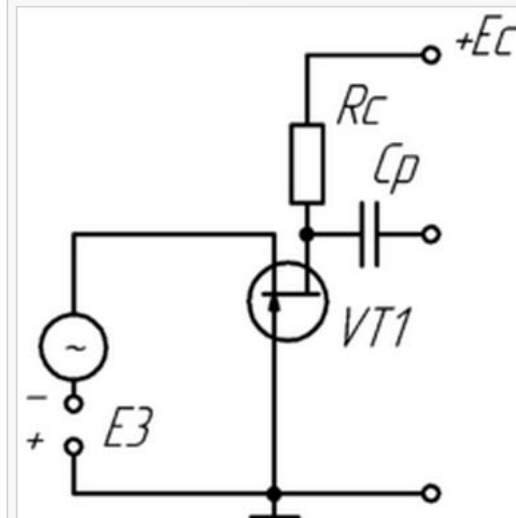


Схема включения полевого транзистора с управляющим р-п-переходом с общим затвором

Преимущества полевых транзисторов перед биполярными

- высокое входное сопротивление
- расходуют мало энергии
- усиление по току намного выше, чем у биполярных транзисторов
- скорость перехода между состояниями проводимости и непроводимости тока на порядок выше, чем у биполярных транзисторов

Недостатки полевых транзисторов перед биполярными

- меньшая предельная температура работы (150С), чем у биполярных транзисторов (200С)
- на частотах выше, примерно, чем 1.5 GHz, потребление энергии у МОП-транзисторов начинает возрастать по экспоненте
- чувствительность к статическому электричеству