

# **Элементная база электронных устройств**

# Современные электронные устройства разрабатываются на основе полупроводниковых материалов (ППМ)

ППМ – это широкий класс материалов с удельным сопротивлением  $\rho = 10^8 - 10^{-6}$  Ом\*м. Наиболее распространенными являются кремний Si и германий Ge. По своим электрическим свойствам ППМ занимают промежуточное место - между **проводниками** и **диэлектриками**.

**Медь** (проводник):  $\rho = 17 \cdot 10^{-9}$  Ом·м;

**Кремний** (полупроводник):  $\rho = 2 \cdot 10^3$  Ом·м.

**Полиэтилен** (диэлектрик):  $\rho = 10^{15}$  Ом·м;

Электропроводность **ППМ**: зависит от **температуры**, **концентрации примесей**, **воздействия светового и ионизирующего излучений**.

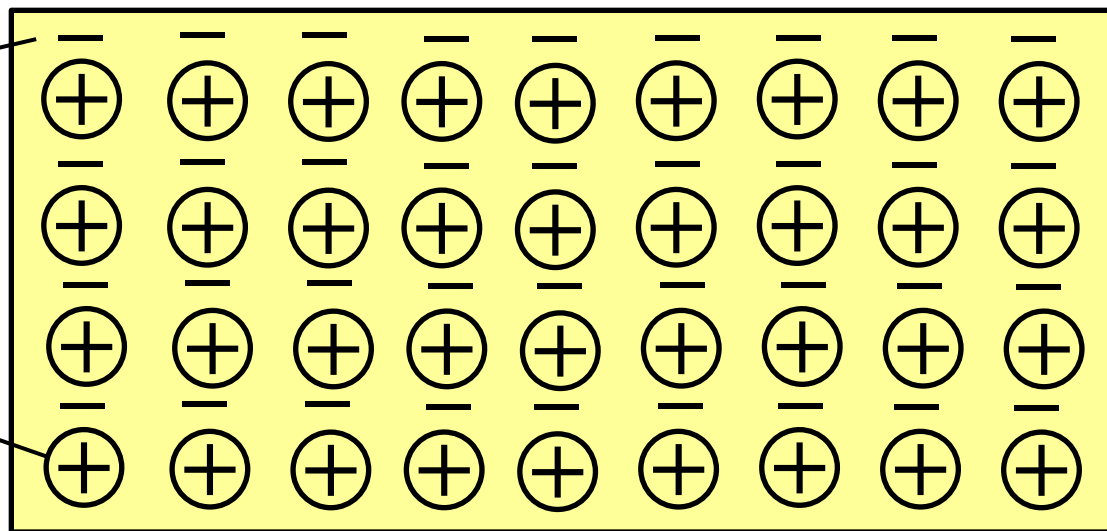
## Примесные полупроводники

При добавлении в четырехвалентный полупроводник (Si) пятивалентного элемента (фосфор P) в структуре примесного полупроводника появляются свободные электроны, при этом атомы фосфора становятся неподвижными положительными ионами.

Такой полупроводник называют полупроводником с электронной проводимостью или полупроводником **n-типа**.

Свободный электрон

Неподвижный ион



## Примесные полупроводники

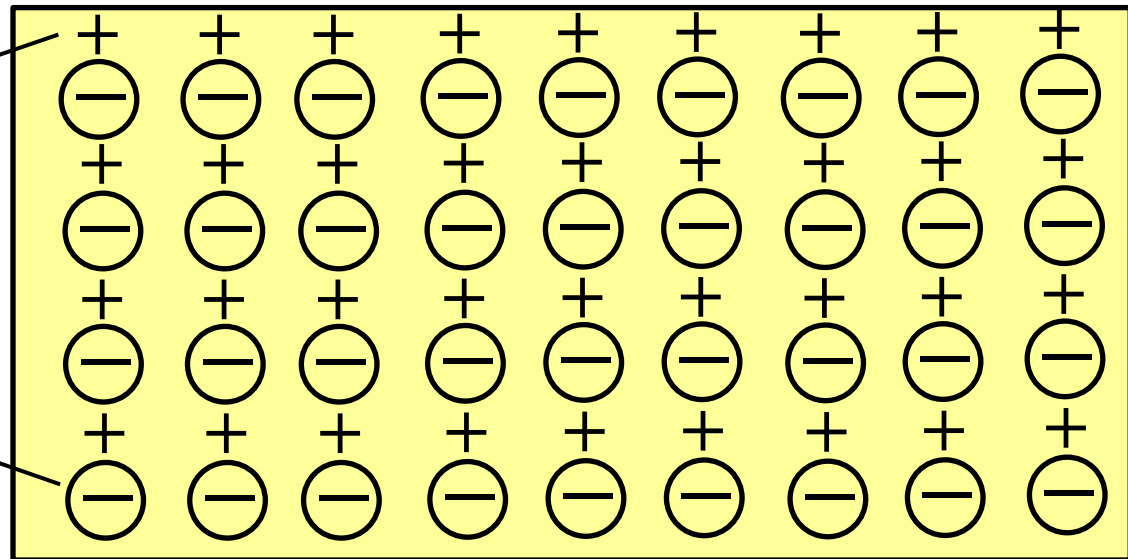
При добавлении в четырехвалентный полупроводник (Si) трехвалентного элемента (индий In) в структуре примесного полупроводника образуются положительные подвижные заряды - «дырки», при этом атомы индия становятся неподвижными отрицательными ионами.

Такой полупроводник называют полупроводником с дырочной проводимостью или полупроводником

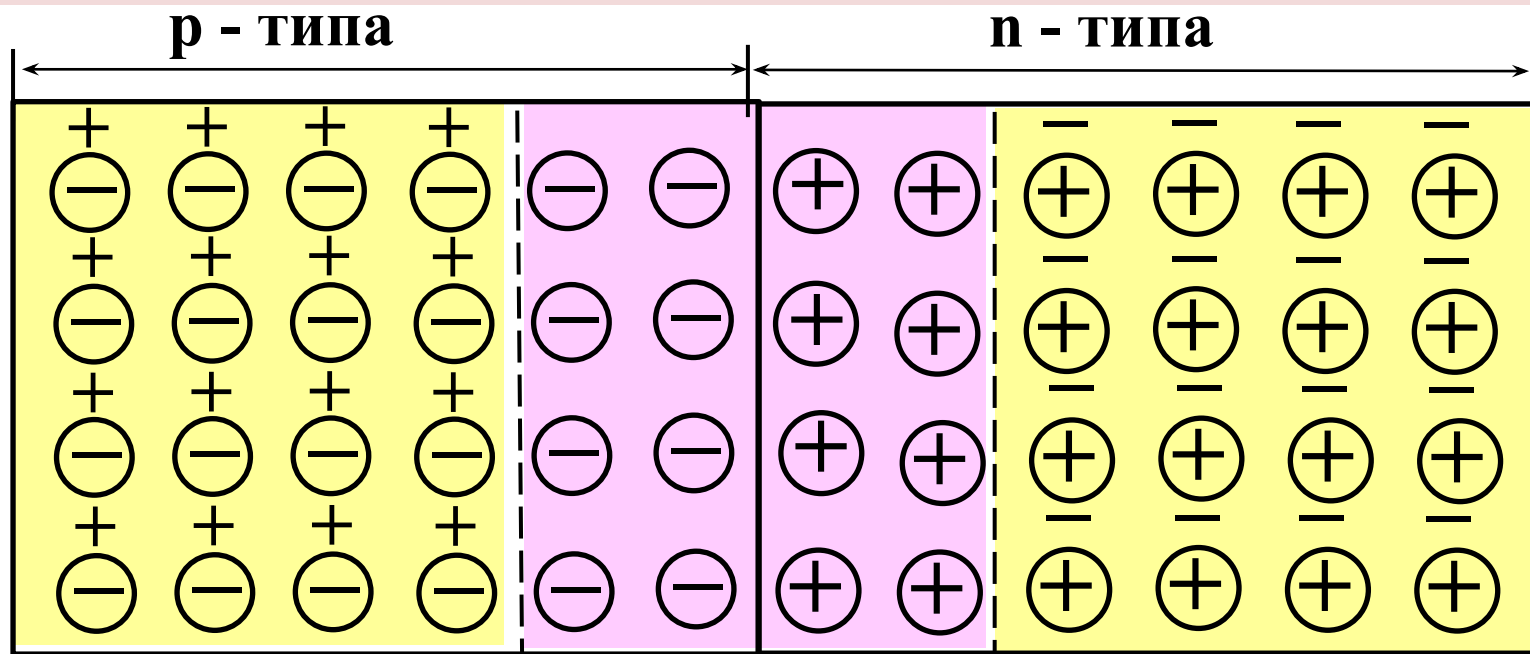
**р-типа.**

Свободная  
дырка

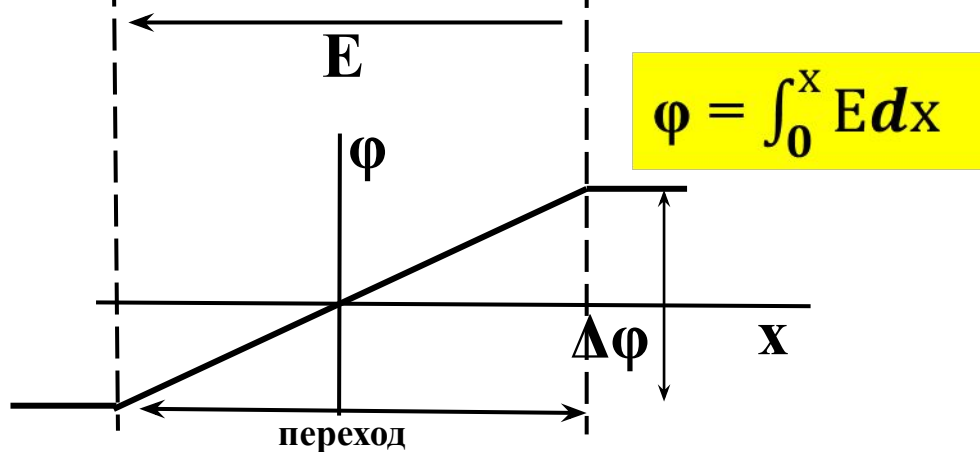
Неподвижный  
ион



# Контактные явления на границе полупроводников p и n типа

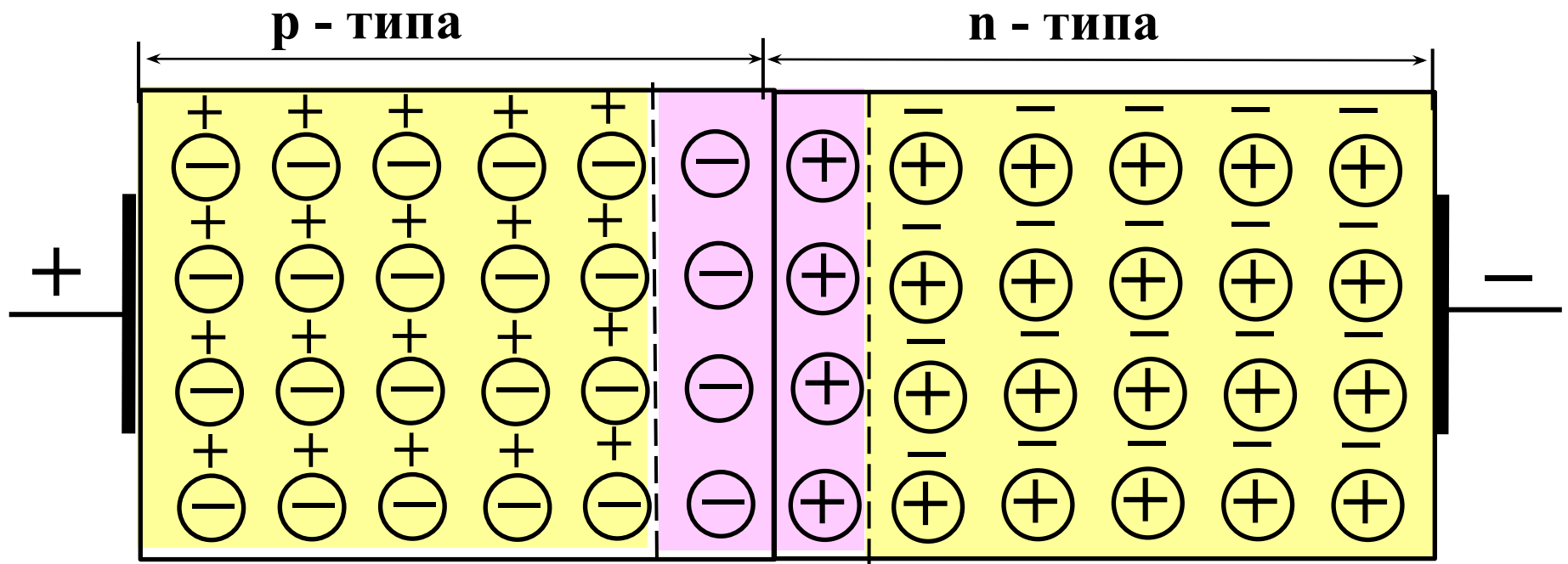


При соединении полупроводников **p** и **n** типов часть дырок диффундирует из **p** области в **n** область, а электронов из **n** в **p** область.

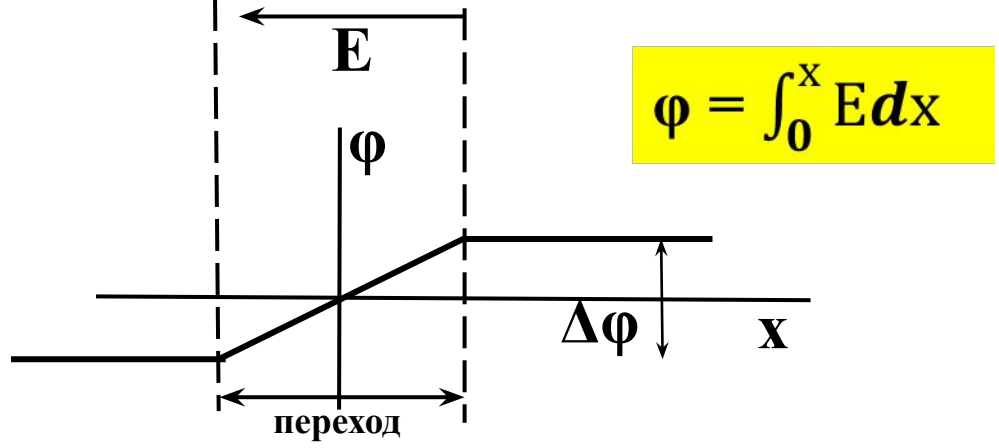


Вдоль границы раздела двух полупроводников возникли слои неподвижных отрицательных и положительных ионов. Возникшее между этими слоями поле ( $E$ ) препятствует дальнейшей диффузии дырок и электронов. При некотором значении  $E$  ток через переход прекращается.

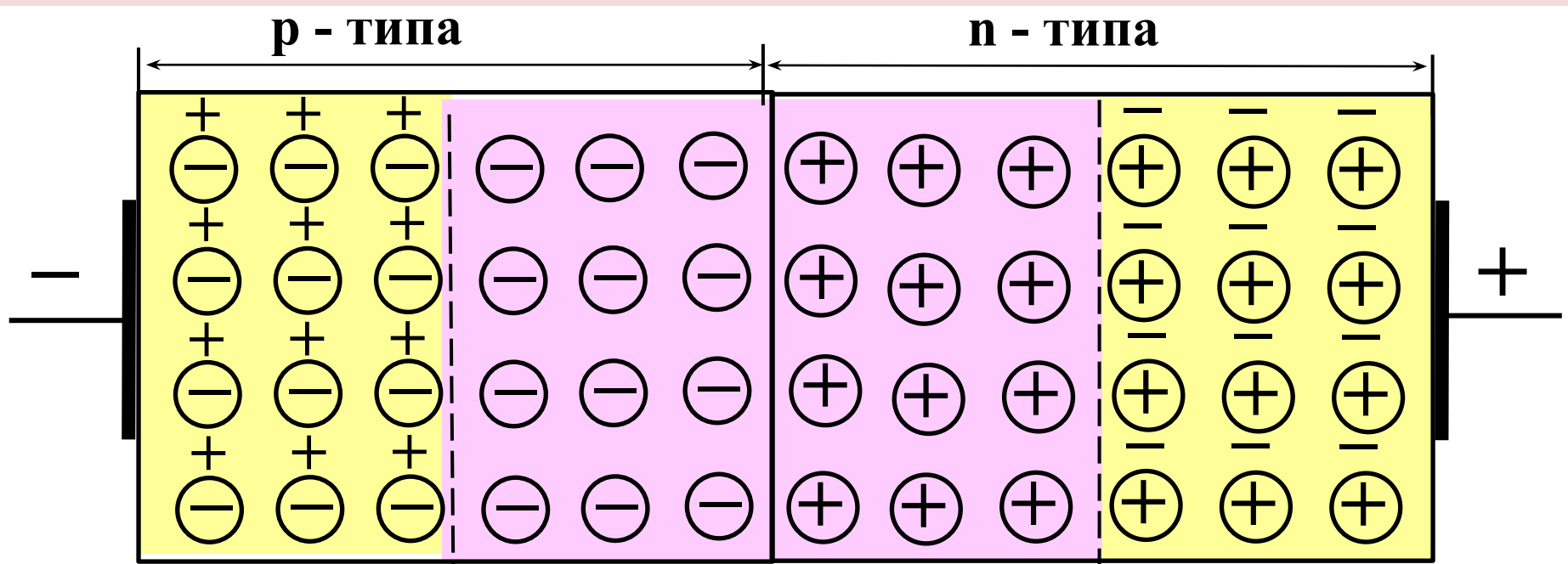
# р-п переход под воздействием внешнего напряжения



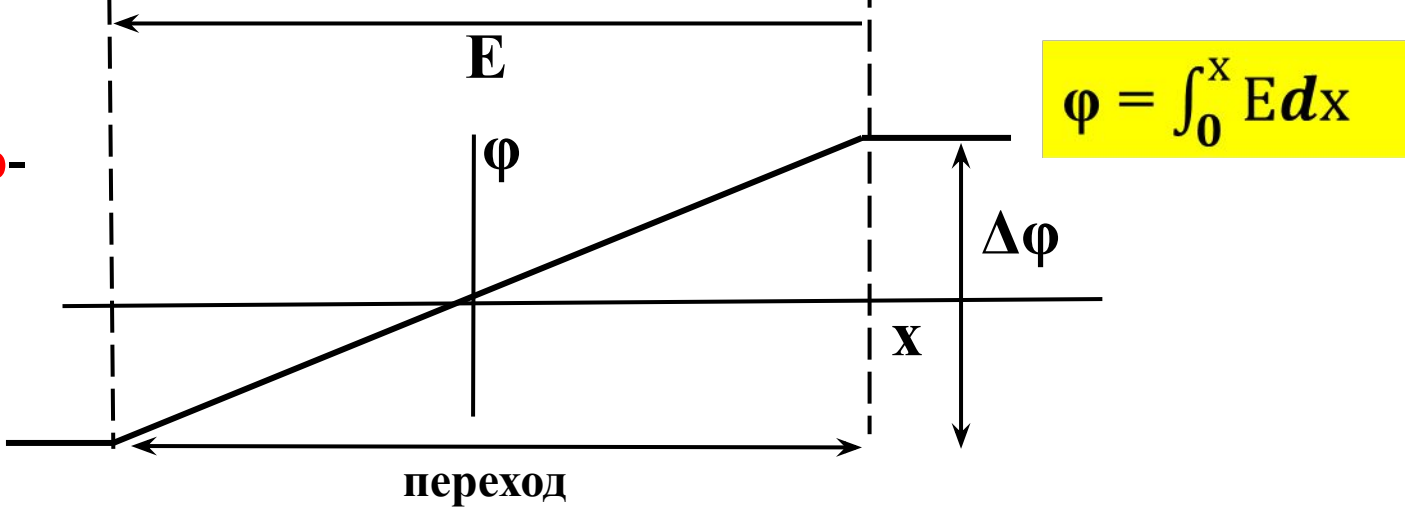
При подаче положительного напряжения (+ к р-области, - к n области) высота потенциального барьера  $\Delta\phi$  уменьшается и через переход протекает ток – прямой ток перехода.



# p-n переход под воздействием внешнего напряжения



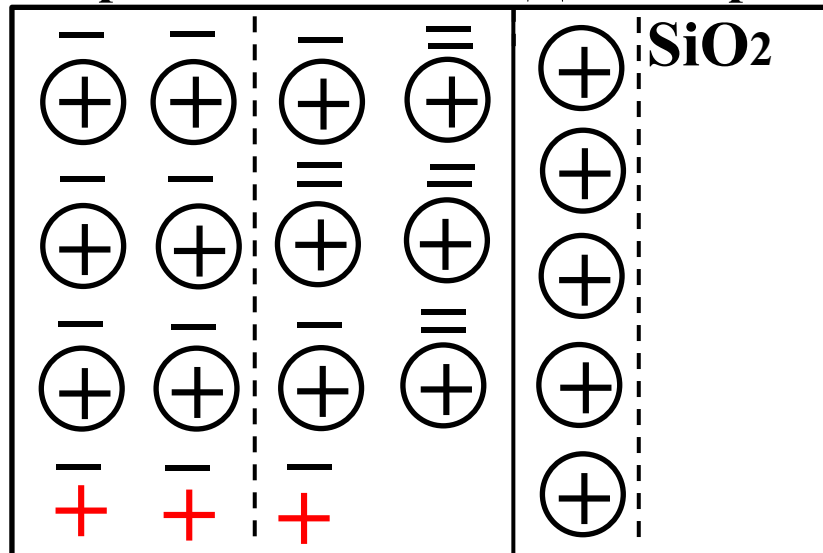
При подаче отрицательного напряжения (- к p-области, + к n-области) высота потенциального барьера  $\Delta\phi$  увеличивается, ток через переход очень мал – обратный ток.



Вывод: p-n переход имеет одностороннюю проводимость (проводит ток в одном направлении и не проводит в другом).

# Контактные явления на границе полупроводника и диэлектрика

П/проводник n типа | Диэлектрик



← E  
Обогащенный слой

Потенциалы выхода электронов:

$$\phi_{\text{Si}(n)} = 4,8 \text{ В}; \quad \phi_{\text{SiO}_2} = 4,4 \text{ В}$$

Так как потенциал выхода электронов из диэлектрика меньше, чем у п/проводника ( $\phi_{\text{Si}(n)} > \phi_{\text{SiO}_2}$ ), то часть электронов из диэлектрика переходит в полупроводник. Поэтому приграничный слой диэлектрика заряжается положительно, а у **n**-п/проводника – отрицательно.

Возникающее при этом поле напряженностью E, препятствует этому процессу, приводя его в равновесие. Под действием этого электрического поля в приграничном слое **n**-п/проводника образуется обогащенный носителями слой



# Контактные явления на границе полупроводника и диэлектрика

П/проводник **p**-типа

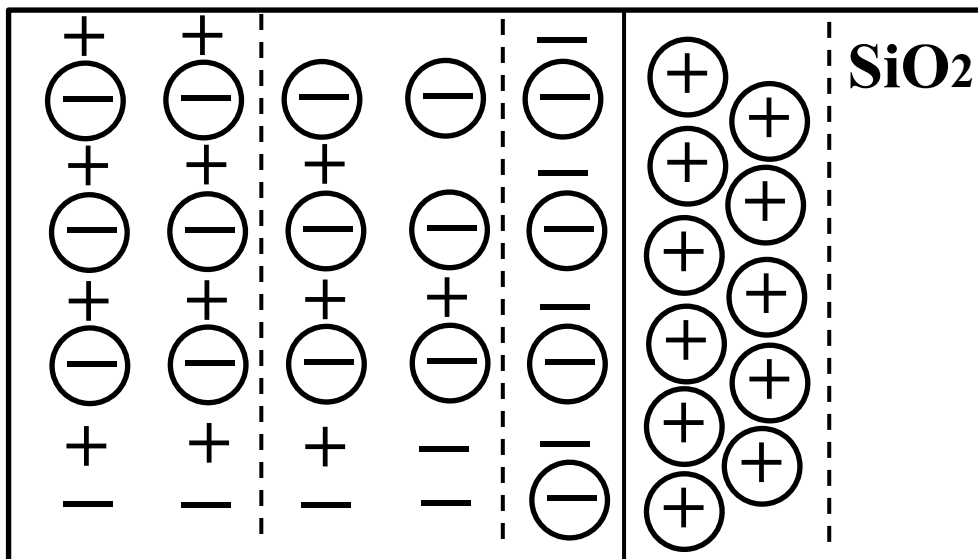
Диэлектрик

Потенциалы выхода электронов:

$$\phi_{\text{Si(p)}} = 4,8 \text{ В}; \quad \phi_{\text{SiO}_2} = 4,4 \text{ В}$$

Так как потенциал выхода электронов из диэлектрика меньше, чем у п/проводника ( $\phi_{\text{Si(n)}} > \phi_{\text{SiO}_2}$ ), то часть электронов из диэлектрика переходит в полупроводник.

Приграничный слой у диэлектрика заряжается положительно, а у **p**-полупроводника – отрицательно.

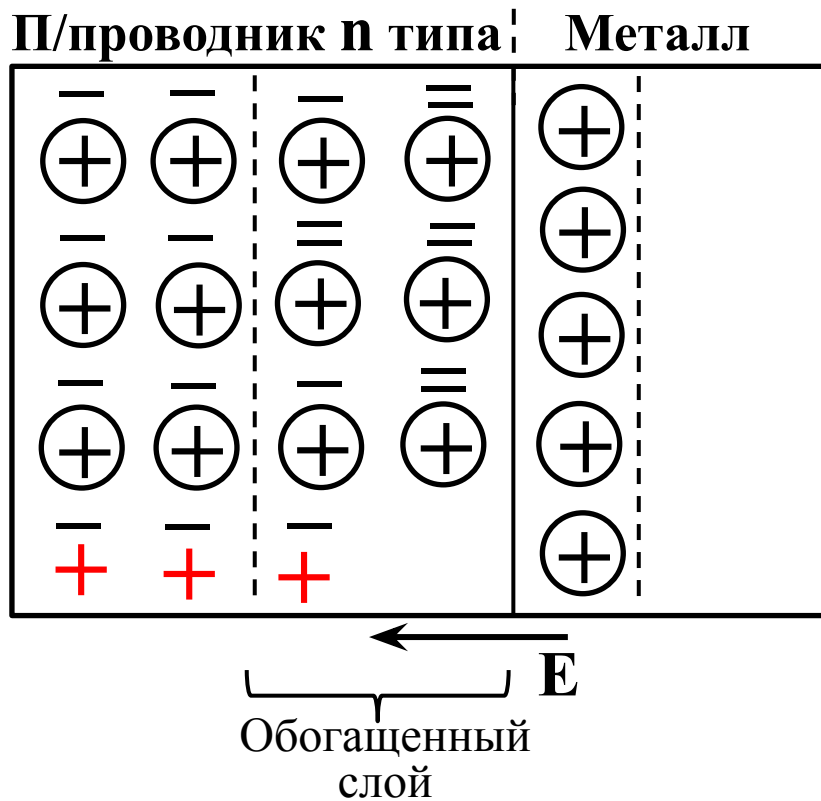


Обедненный слой      Инверсный слой

Для полупроводника **p**-типа это означает смену типа проводимости в приграничной области, т.е. образование **инверсного слоя**.

Далее следует обедненный носителями слой из-за рекомбинации значительной части дырок (основных носителей) с электронами, поступившими из диэлектрика.

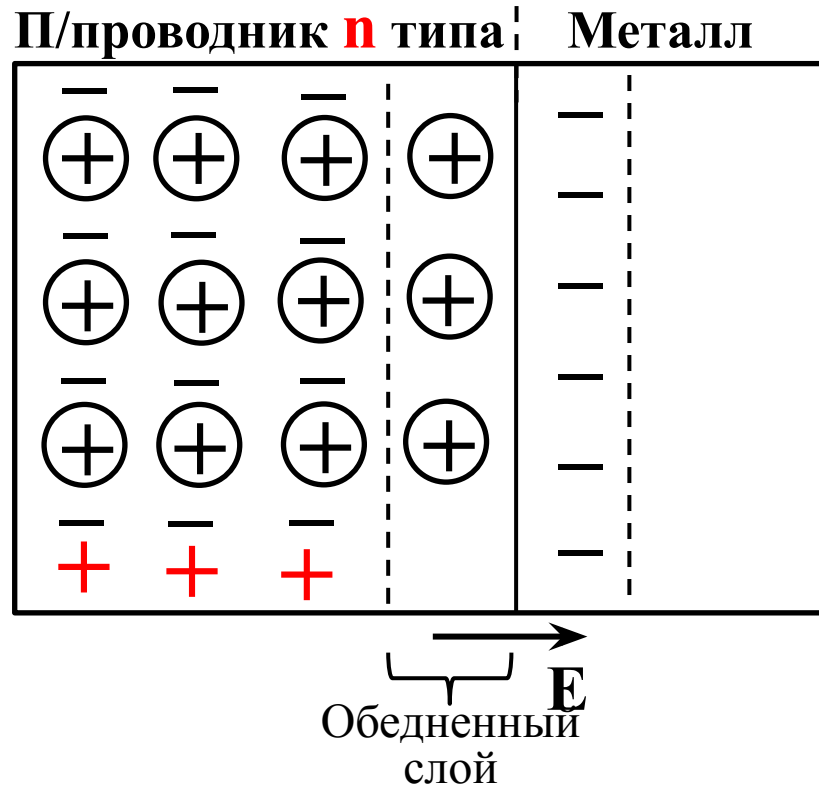
# Контактные явления на границе полупроводника и металла



Если потенциал выхода для металла  $\phi_M$  меньше потенциала выхода для полупроводника n-типа  $\phi_{Si(n)}$  ( $\phi_{Si(n)} > \phi_M$ ), то происходит преимущественный переход электронов из металла в полупроводник, в приграничной области которого возникает обогащенный слой.

Такой контакт проводит ток в обоих направлениях и используется для создания выводов полупроводниковых приборов

# Контактные явления на границе полупроводника и металла



Если потенциал выхода для металла  $\phi_m$  больше потенциала выхода для полупроводника **n**-типа  $\phi_{Si(n)}$ , то у границы раздела в металле образуется слой с отрицательным зарядом, а в полупроводнике – обедненный слой с положительным зарядом.

Такой контакт обладает односторонней проводимостью переходы такого типа называют барьерами Шоттки. по имени автора исследовавшего их ученого.

# **Полупроводниковые диоды**

# Полупроводниковые диоды (ПД)

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор, использующий свойство односторонней проводимости **p-n** перехода.

## Классификация ПД

*По используемому полупроводниковому материалу*

Кремниевые

Германиевые

Арсенидгалиевые

*По технологии изготовления*

Точечные

Плоскостные

Диффузионные

*По принципу действия*

Диоды Шоттки

Туннельные

Излучающие

Фотодиоды

*По назначению*

Выпрямительные

Импульсные

Стабилитроны

Варикапы

# Кремниевые диоды

- Особенности конструкции

На каждой стороне диода имплантируются примеси (бор на стороне анода, мышьяк или фосфор на стороне катода), а соединение, где встречаются примеси - «р-n-переход».

Кремниевые диоды имеют прямое смещение напряжения 0.7В.

- Параметры работы

Как только разность напряжений между анодом и катодом достигает 0.7 В, диод начнет проводить электрический ток через его р-n-переход.

Когда разность напряжений падает менее 0.7 В, р-n-соединение прекратит проводить электрический ток, и диод перестанет функционировать как электрический путь.

# Германиевые диоды

- Германиевые диоды изготавливаются аналогично кремниевым диодам. В германиевых диодах также используется р-n-переход и имплантируются те же примеси, которые имплантируются в кремниевые диоды.
- Однако германиевые диоды имеют напряжение смещения 0.3 вольта.

# Арсенидгаллиевые диоды

**Отличаются** в несколько раз меньшими массогабаритными показателями, так как позволяют работать из-за повышенной ширины запрещенной зоны при температурах перехода до +240... +280 °С.

- Столь высокие допустимые значения температуры перехода обеспечивают также выигрыш в массе радиоэлектронных устройств за счет уменьшения теплорассеивающих элементов.

**Преимущества** арсенида галлия по сравнению с кремнием

- большая подвижность носителей заряда, что позволяет использовать диоды в диапазоне частот преобразования 100...500 кГц. Переключая импульсные токи до 500 А
- .В настоящее время промышленностью выпускаются арсенидгаллиевые диоды на импульсное обратное напряжение 100...600 В, средний прямой ток до 50 А, импульсное прямое напряжение до 2,5 В с временем обратного восстановления до 0,5 мкс.



# Точечный диод

## Особенности конструкции

- полупроводниковый диод с очень малой площадью p-n перехода, который образуется в результате контакта тонкой металлической иглы с нанесенной на неё примесью и полупроводниковой пластинки с определенным типом проводимости. Благодаря малой площади p-n перехода, и как следствие маленькой ёмкости перехода, точечный диод обычно имеет предельную частоту около 300—600 МГц.
- **Недостатки** механическая прочность, невысокий максимальный ток и чувствительность к перегрузкам, обусловленные малой площадью p-n перехода.

# Плоскостные диоды

## Особенности конструкции

- имеют плоский электрический переход, линейные размеры которого, определяющие его площадь, значительно больше ширины р-n-перехода. Площадь может составлять от сотых долей квадратных миллиметров (микроплоскостные диоды) до нескольких десятков квадратных сантиметров (силовые диоды). Переход выполняют в основном методами сплавления.
- **Используются** для работы на частотах до 10 кГц. Ограничение по частоте связано с большой барьерной емкостью р-n-перехода (до десятков пикофард). Плоскостные диоды бывают малой мощности (до 1 Вт), средней мощности (на токи до 1 А, напряжение до 600 В) и мощные (на токи до 2000 А).

# Диффузионные диоды

## Особенности конструкции

- Переход создается посредством диффузии примеси, находящейся в газообразной, жидкой или твердой фазах, в полупроводниковую пластину. Если диффузия примеси проводится через отверстия (окна) в защитном слое, нанесенном на поверхности полупроводника, то получают так называемый планарный р/п переход.
- Диффузионные диоды отличаются от сплавных меньшей собственной емкостью и малым значением постоянной времени

# диоды Шоттки

## Особенности конструкции

- в отличие от обычных диодов на основе p-n перехода, используется переход металл-полупроводник, который ещё называют барьером Шоттки. Этот барьер, так же, как и полупроводниковый p-n переход, обладает свойством односторонней электропроводимости и рядом отличительных свойств.
- В качестве материала для изготовления диодов с барьером Шоттки используется кремний (Si) и арсенид галлия (GaAs), а также такие металлы как золото, серебро, платина, палладий и вольфрам.

## Характеристики

малое прямое падение напряжения (0,2-0,4 В) на переходе и высокое быстродействие. Максимальное обратное напряжение обычно до 250В .

## Недостатки

при кратковременном превышении обратного напряжения они мгновенно выходят из строя и главное необратимо. В то время как кремниевые силовые вентили после прекращения действия превышенного напряжения прекрасно самовосстанавливаются и продолжают работать. Кроме того обратный ток диодов очень

# Туннельный диод

## Особенности конструкции

- В материале диода имеются присадки в гораздо большем объеме, нежели в обычном диоде, а его P-N переход очень узкий и хорошо проводит ток в обе стороны. Потенциал, который необходим для того, чтобы заставить туннельный диод выступать в роли проводника, будь то в режиме прямого или обратного смещения, очень невелик, обычно этот потенциал находится в диапазоне милливольт. Именно поэтому туннельные диоды известны как приборы с низким сопротивлением.
- В обычных условиях туннельные диоды работают в области своего отрицательного сопротивления. В данной области незначительное уменьшение напряжения включает этот прибор, а небольшое повышение — выключает его. В качестве такого своеобразного выключателя туннельный диод может использоваться либо как генератор, либо как высокоскоростной выключатель.
- Могут также использоваться в качестве усилителей, где изменения в подаваемом напряжении в сторону повышения, вызывают пропорционально более значительные изменения тока в цепи.

# Излучающий диод

- работающий в видимом диапазоне волн, часто называют светоизлучающим, или светодиоидом.
- Излучение возникает при протекании прямого тока диода в результате рекомбинации электронов и дырок в области р-n-перехода и в областях, примыкающих к указанной области. При рекомбинации излучаются фотоны. Для излучающих диодов, работающих в видимом диапазоне (длина волны от 0,38 до 0,78 мкм, частота около, но меньше  $10^{15}$  Гц), Для излучающих диодов, работающих не в видимом диапазоне, используют характеристики, отражающие зависимость мощности излучения  $P$  от тока диода  $i$

# ФОТОДИОДЫ

**Принцип работы** основан на воздействии оптического излучения. В результате, материал изменяет свои качества, что позволяет ему выполнять различные функции в электрических цепях.

Простой фотодиод является обыкновенным полупроводниковым диодом с р-п-переходом, на который оказывает действие оптическое излучение. При полном отсутствии светового потока, диод находится в состоянии равновесия и обладает обычными свойствами.

Действие излучения направлено на р-п-переход. Энергия, с которой поглощаются фотоны, превышает ширину запрещенной зоны, что приводит к возникновению электронно-дырочных пар. Данные пары, состоящие из электронов и дырок, получили наименование фотоносителей

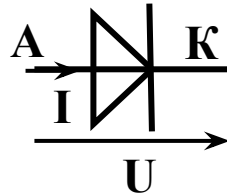
# Выпрямительные диоды

Это диоды, использующие одностороннюю проводимость р-п перехода и применяются в выпрямителях.

Обозначение на схемах:

Анод - А

Катод - К

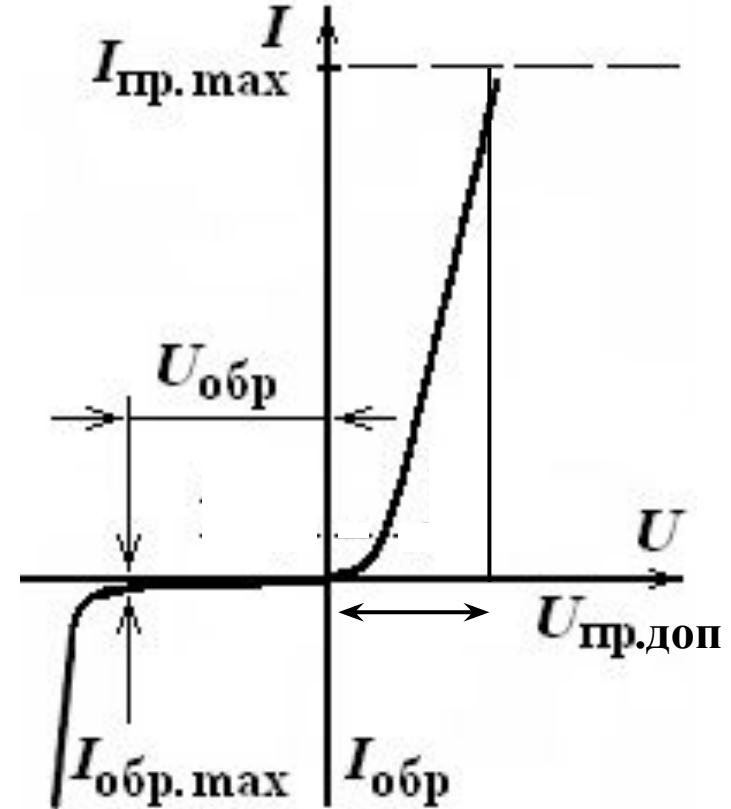


Параметры:

Допустимый прямой ток  $I_{\text{пр.мах}}$  и соответствующее ему прямое напряжение  $U_{\text{пр.доп}}$  (0,5 В для Ge, 1,5 В для Si)

Допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр}}$  (100...400В у Ge и 1000...1500 В для Si) соответствующий ему обратный ток  $I_{\text{обр.мах}}$

Допустимая мощность рассеяния  $P_{\text{рас.}}$   
Допустимая температура окружающей среды (до 50°С для Ge и до 150°С для Si)



Вольтамперная характеристика диода



# Классификация выпрямительных диодов

*По мощности*

Маломощные ( $I_{пр} \leq 0,3 \text{ А}$ )

Средней мощности ( $0,3 < I_{пр} < 10 \text{ А}$ )

Большой мощности ( $I_{пр} > 10 \text{ А}$ )

*По частоте*

Низкочастотные ( $f_{max} < 10^3 \text{ Гц}$ )

Высокочастотные ( $f_{max} > 10^3 \text{ Гц}$ )

## Внешний вид выпрямительных диодов



# Импульсные диоды

**Характеристика:** диод имеющий малую длительность переходных процессов и являющийся составной частью импульсной схемы, работающей на высокой частоте. Для данных целей наиболее подходят диоды с оптимизированными собственными ёмкостью и временем, требующимся на то, чтобы обратное сопротивление восстановилось. Достижение необходимого показателя происходит:

по первому параметру при уменьшении длины и ширины p-n — перехода, это соответственно сказывается и на уменьшении допустимых мощностей рассеивания.

по второму параметру при использовании сильно легитированных полупроводниковых элементов (например, легитация кремниевых пластины используется золото).

Величина барьерной ёмкости меньше 1пФ.

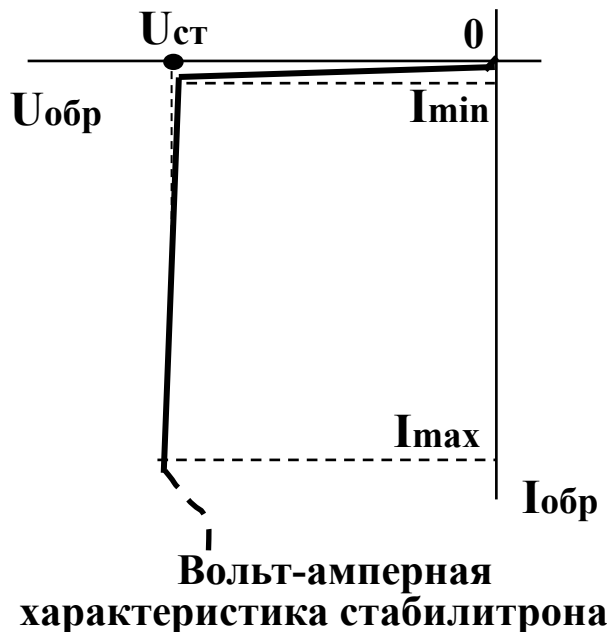
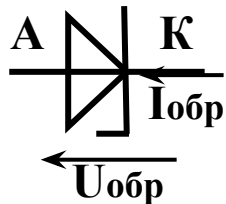
**Область применения,** с помощью импульсных диодов можно сконструировать электронный ключ, генератор, модулятор и

# Стабилитроны

Это диоды (опорные диоды), предназначенные для стабилизации постоянного напряжения.

В стабилитроне используется явление неразрушающего электрического пробоя (лавинного пробоя) р-n перехода при определенных значениях обратного напряжения  $U_{обр} = U_{проб} = U_{ст}$ .

Обозначение на схемах



На участке пробоя при незначительном изменении напряжения ток изменяется в широких пределах ( $I_{min} \div I_{max}$ ).

Основные параметры:

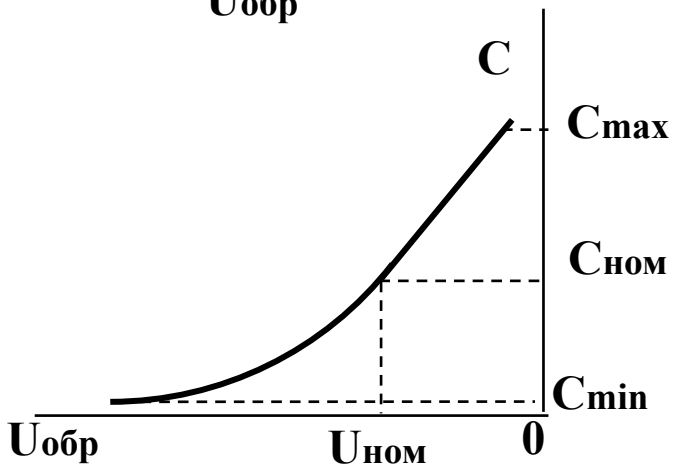
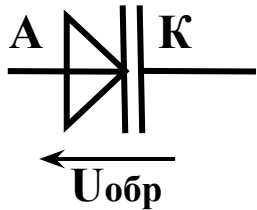
1.  $U_{ст}$  – напряжение стабилизации (единицы, десятки вольт).
2.  $I_{min}$ ,  $I_{max}$  – минимальный и максимальный ток стабилизации.
3.  $P_{max}$  - максимально допустимая рассеиваемая мощность.
4.  $TKH = \Delta U / (U_{ст} \Delta T)$  – температурный коэффициент напряжения стабилизации ( $\Delta U$  – отклонение напряжения стабилизации от номинального при изменении температуры в интервале  $\Delta T$ )

# Варикапы

Это диоды, в которых используется емкостные свойства обратного смещенного р-п перехода.

При изменении напряжения на стабилитроне изменяется емкость р-п перехода, что позволяет использовать его в качестве элемента с электрически управляемой емкостью..

Обозначение на схемах



Вольт-фардовая характеристика варикапа

Основные параметры:

1. **C<sub>ном</sub>** – номинальная емкость варикапа при номинальном смещении
2. **C<sub>min</sub>** – минимальная емкость варикапа при заданном минимальном смещении
3. **C<sub>max</sub>** – максимальная емкость варикапа при заданном максимальном смещении
4. **K<sub>T</sub>** – температурный коэффициент емкости – это относительное изменение емкости варикапа для заданного смещения при изменении температуры окружающей среды на 1 градус в заданном интервале температур

# Транзисторы

# Транзисторы

Транзистор – это полупроводниковый прибор, способный усиливать электрическую мощность

## ТРАНЗИСТОРЫ

```
graph TD; A[ТРАНЗИСТОРЫ] --> B[БИПОЛЯРНЫЕ (БПТ)]; A --> C[УНИПОЛЯРНЫЕ (УТ)];
```

### БИПОЛЯРНЫЕ (БПТ)

Физические процессы связаны с движением носителей двух видов: **электронов и дырок**.

Неотъемлемой частью является **взаимодействие двух р-п** переходов.

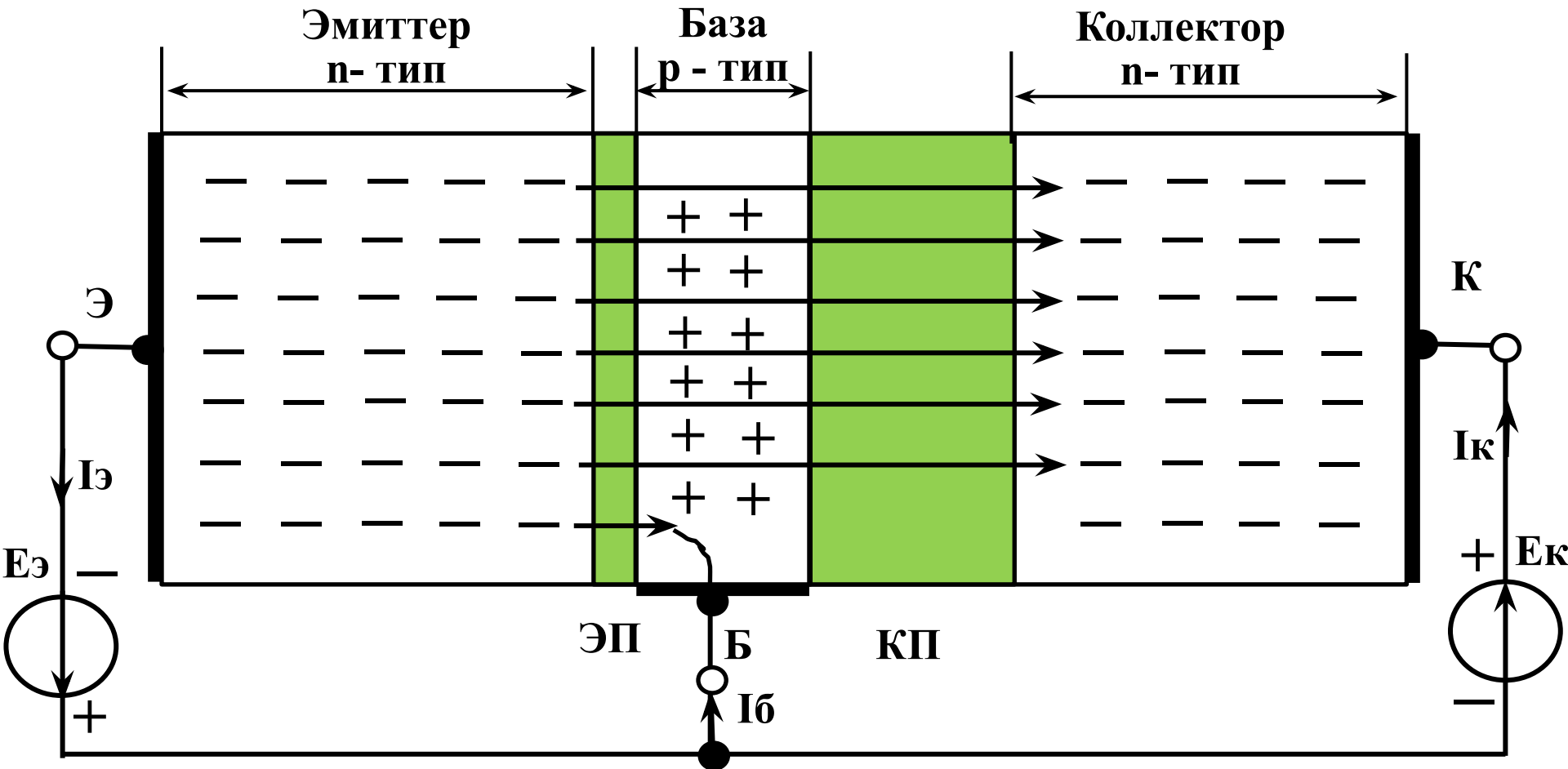
### УНИПОЛЯРНЫЕ (УТ)

Физические процессы связаны с движением носителей только одного типа: **электронов** или **дырок**.

**Основной** способ движения носителей - это **дрейф** носителей в электрическом поле

# **Биполярные транзисторы**

# Структура БПТ и принцип его работы



Э - эмиттер  
К - коллектор  
Б - база

Электроды  
транзистора

ЭП – эмиттерный переход

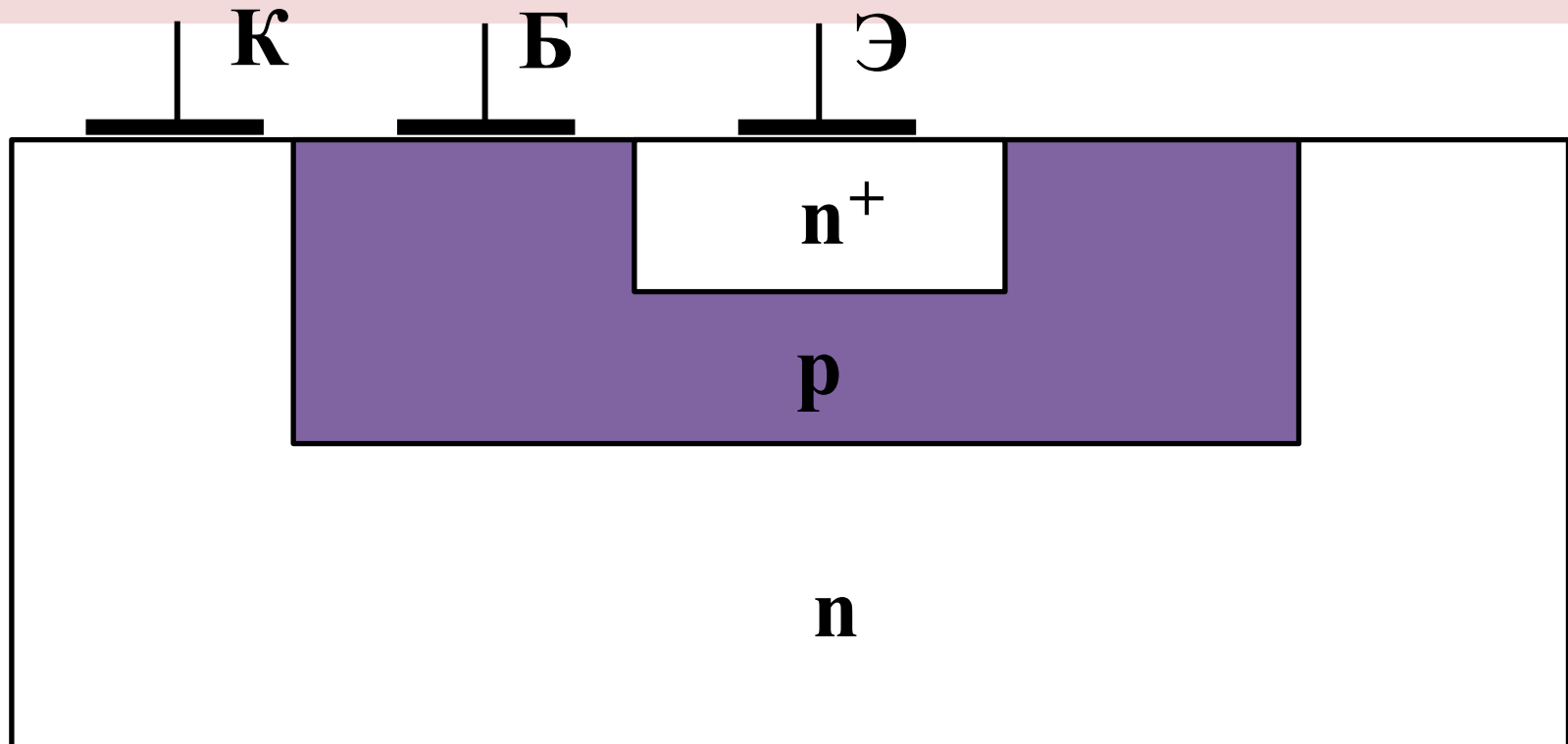
КП – коллекторный переход



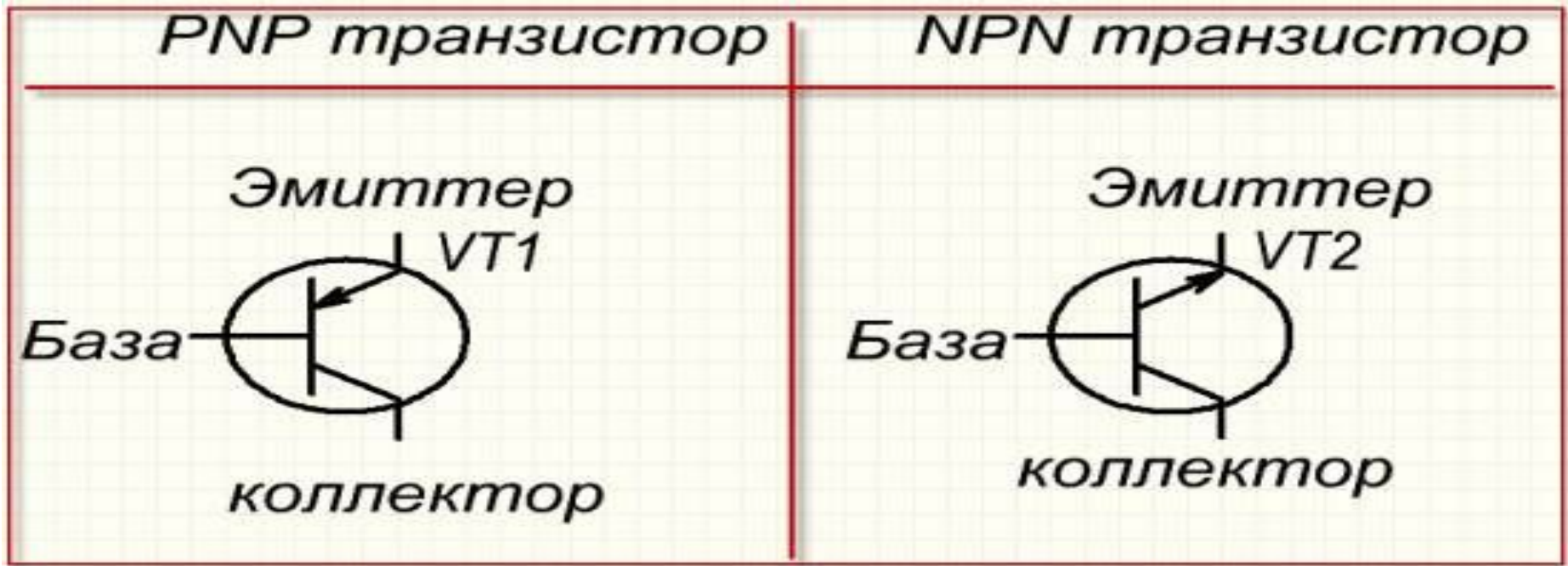
# Конструктивное исполнение БПТ

Площадь коллекторного перехода (р-п) больше площади эмиттерного перехода ( $n^+ - p$ ).

Эмиттер значительно сильнее легирован чем коллектор, поэтому поток электронов в базу будет значительно больше, чем встречный поток дырок при прямом включении эмиттерного перехода.



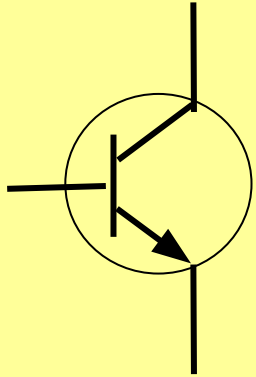
Биполярные транзисторы имеют три вывода и конструктивно выглядят совершенно по-разному, но на электрических схемах они выглядят всегда одинаково.



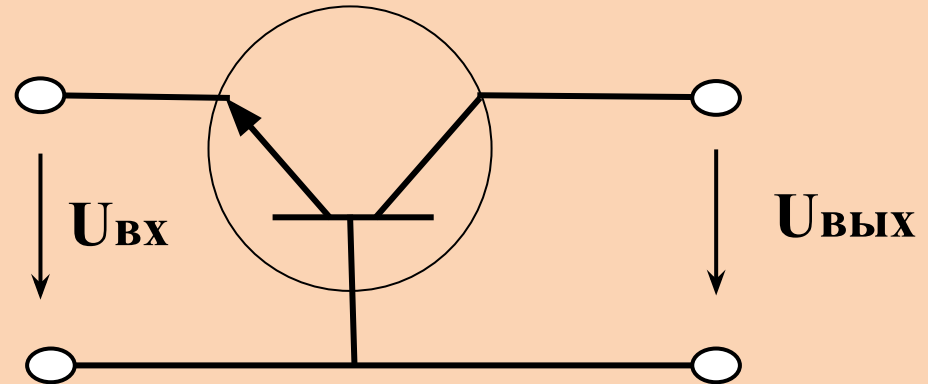
Это изображение называют УГО  
(Условное графическое обозначение)

# Обозначение и схемы включения БПТ

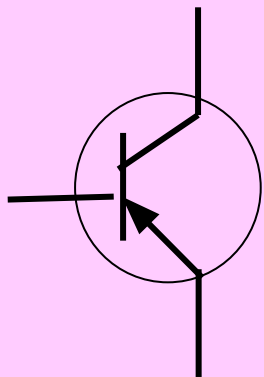
**п-р-п типа**



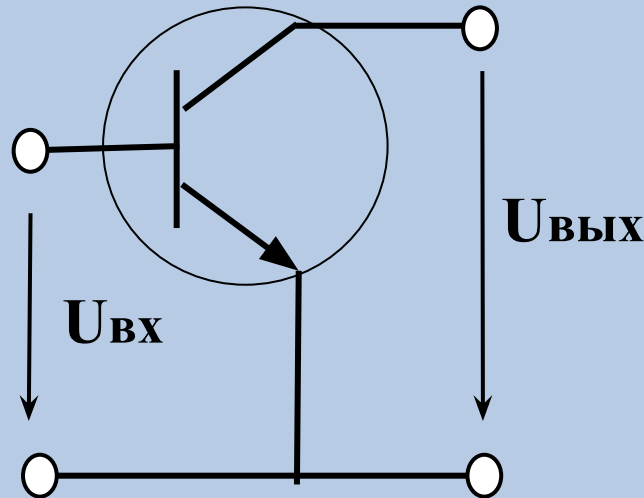
**С общей базой**



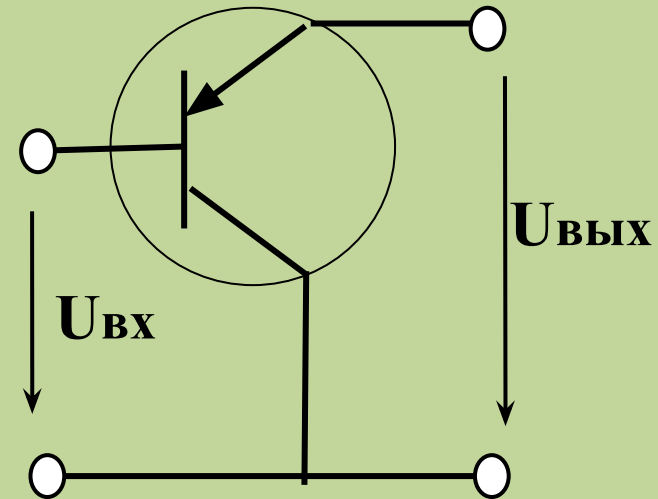
**р-п-р типа**



**С общим эмиттером**



**С общим коллектором**



# Отличие n-p-n транзистора от p-n-p транзистора

- состоит лишь в том **что** является «переносчиком» электрического заряда (электроны или «дырки» ).
- Т.е. для p-n-p транзистора электроны перемещаются от эмиттера к коллектору и управляются базой.
- Для n-p-n транзистора электроны идут уже от коллектора к эмиттеру и управляются базой.

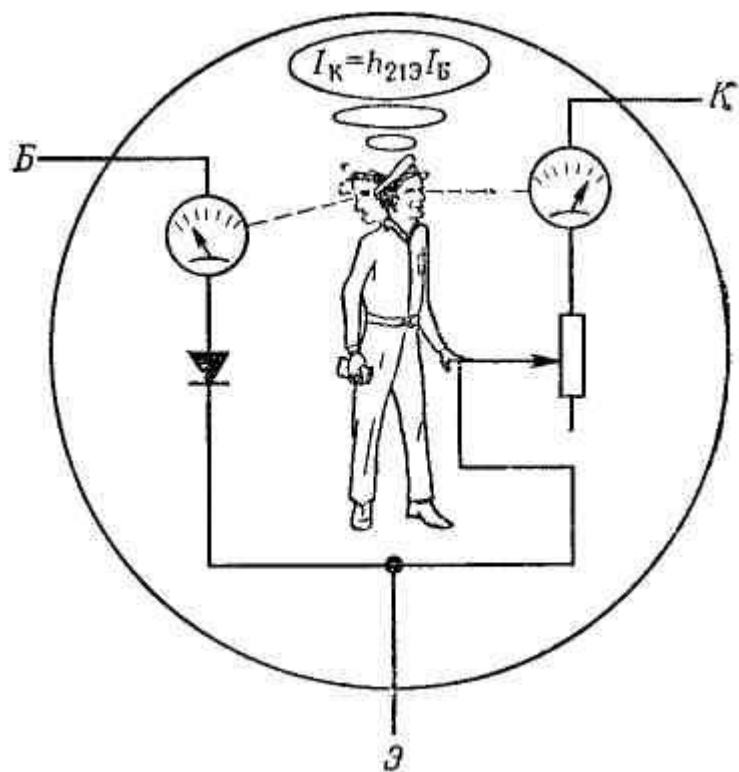
**Вывод:** для того чтобы в схеме заменить транзистор одного типа проводимости на другой достаточно изменить полярность приложенного

- Выводы транзисторов определяют по справочнику, но можно просто [прозвонить транзистор мультиметром](#).
- Выводы транзистора звонятся как два диода, соединенные в общей точке (в области базы).



- Слева изображена картинка для транзистора p-n-p типа, при прозвонке создается ощущение (посредством показаний мультиметра), что перед вами два диода которые соединены в одной точке своими катодами.
- Для транзистора n-p-n типа диоды в точке базы соединены своими анодами.

# Как работает транзистор?



На этом изображении человек посредством реостата управляет током коллектора. Он смотрит на ток базы, если ток базы растет то человек также увеличивает ток коллектора с учетом коэффициента усиления транзистора  $h_{21Э}$ . Если ток базы падает, то ток коллектора также будет снижаться — человек

Эта аналогия не имеет ничего общего с реальной работой транзистора, но она облегчает понимание принципов его работы посредством реостата.

## Для транзисторов можно отметить правила, которые призваны помочь облегчить понимание.

- Коллектор имеет более положительный потенциал, чем эмиттер
- Цепи база — коллектор и база — эмиттер работают как диоды
- Каждый транзистор характеризуется предельными значениями, тока коллектора, тока базы и напряжения коллектор-эмиттер.

$$I_K = h_{21Э} I_B = \beta I_B$$

- В том случае если правила 1-3 соблюдены то ток коллектора  $I_K$  прямо пропорционален току базы  $I_B$ . Такое соотношение можно записать в виде формулы.
- Из этой формулы определено свойство  $h_{21Э}$  транзистора — небольшой ток базы управляет большим током коллектора.  $\beta$

# Режимы работы БПТ

## Режим отсечки

На ЭП и КП поданы обратные напряжения. Обратные токи через переходы малы. Можно считать, что между выводами транзистора обрыв. Токов во внешней цепи нет

## Режим насыщения

На ЭП и КП поданы прямые напряжения. Через переходы протекает большой ток.

Можно считать, что между выводами короткое замыкание. Ток в цепи определяется сопротивлением внешней цепи

## Активный режим

На ЭП подано прямое, а на КП-обратное напряжение. Используется для усиления сигналов, обеспечивая минимальные искажения

## Инверсный режим

На ЭП подано обратное, а на КП-прямое напряжение. Не находит широкого применения



# Работа БПТ в активном режиме

В активном режиме электроны из эмиттера поступают в базу. Так как база выполнена достаточно тонкой, то большинство электронов проходят ее, попадают под действие обратно смещенного коллекторного перехода и переходят в коллектор, а далее до коллекторного вывода и далее образуя коллекторный ток.

Часть электронов рекомбинирует в базе транзистора, вызывая ток во внешней цепи базы  $I_b$ .

Таким образом: 
$$I_э = I_к + I_б$$

## Параметры транзистора:

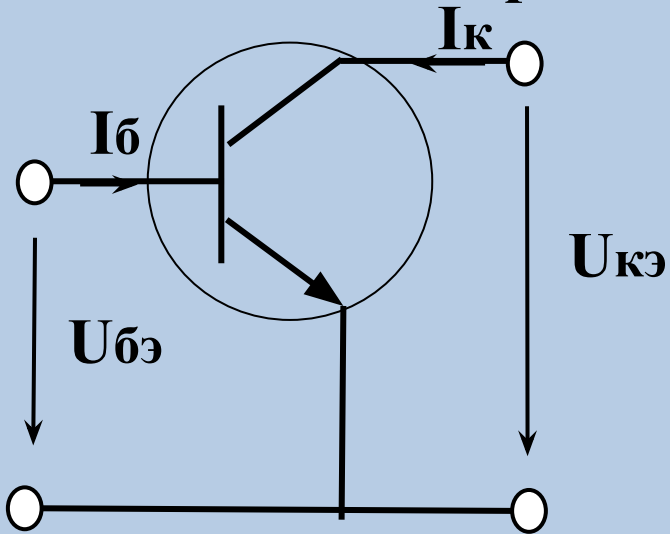
1.  $\alpha = \Delta I_к / \Delta I_э$  - коэффициент передачи эмиттерного тока;
2.  $\beta = \Delta I_к / \Delta I_б$  - коэффициент передачи тока базы.

Полный ток коллектора  $I_к = \alpha I_э + I_{к0}$ ,

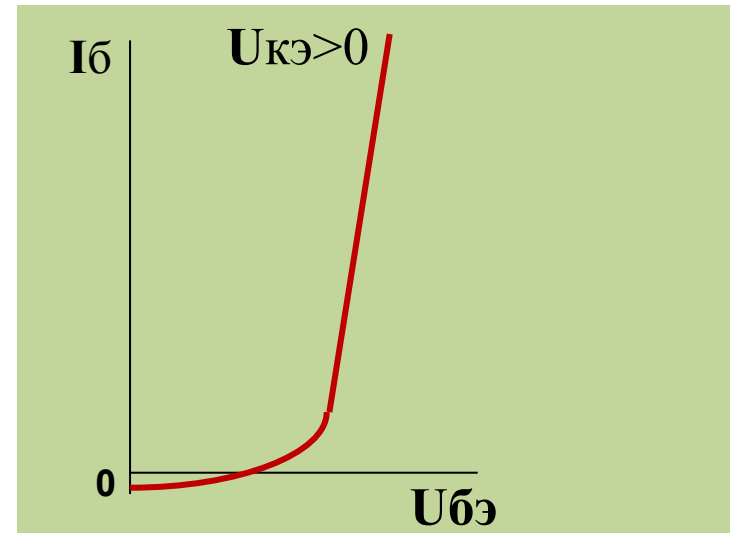
где  $I_{к0}$  – тепловой ток коллекторного перехода

# Вольтамперные характеристики БПТ

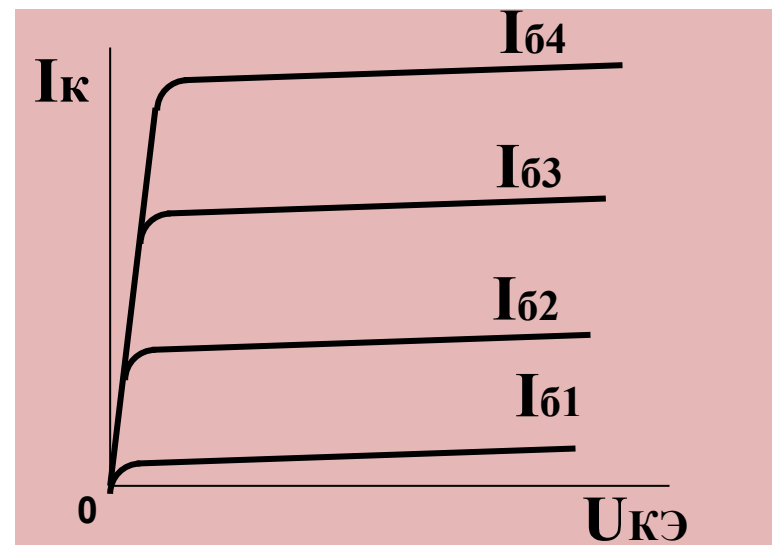
С общим эмиттером



$$I_{\text{б}} = F(U_{\text{бэ}}) \text{ при } U_{\text{кэ}} = \text{const}$$



$$I_{\text{к}} = F(U_{\text{кэ}}) \text{ при } I_{\text{б}} = \text{const}$$



Предельные параметры БПТ:

1.  $I_{\text{кmax}}$  - максимально допустимое значение коллекторного тока;
2.  $U_{\text{кmax}}$  - максимально допустимое значение коллекторного напряжения;
3.  $P_{\text{max}} \approx U_{\text{кэ}} I_{\text{к}}$  - допустимая мощность рассеяния

# Полевые транзисторы

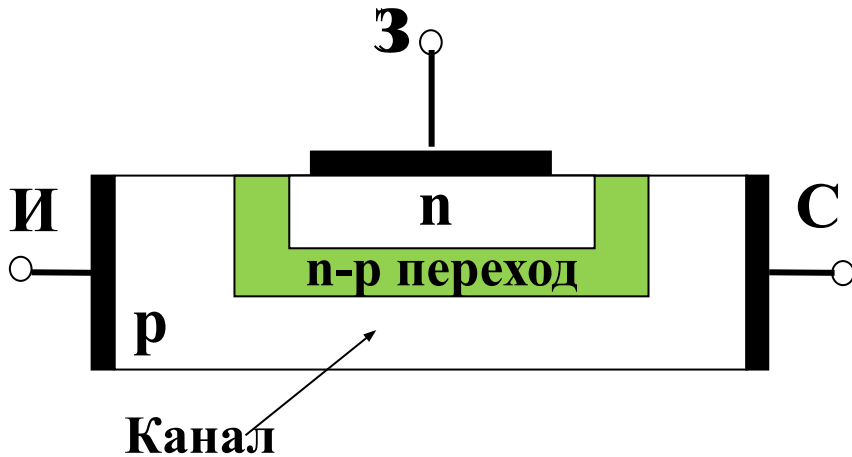
- **Полевой транзистор** – это полупроводниковый полностью управляемый ключ, управляемый электрическим полем. Электрическое поле создается напряжением, приложенным к затвору относительно истока. Полярность управляющего напряжения зависит от типа канала транзистора.
- *Это главное отличие с точки зрения практики от биполярных, которые управляются током..*
- Другое название полевых транзисторов – униполярные. «УНО» - значит один. В полевых транзисторах в зависимости от типа канала ток осуществляется только одним типом носителей дырками или электронами.

## У всех типов полевых транзисторов есть три вывода

- 1. **Исток** (источник носителей заряда, аналог эмиттера на биполярном).
- 2. **Сток** (приемник носителей заряда от истока, аналог коллектора биполярного транзистора).
- 3. **Затвор** (управляющий электрод, аналог сетки на лампах и базы на биполярных транзисторах).

# Полевые транзисторы

С управляющим n-p переходом

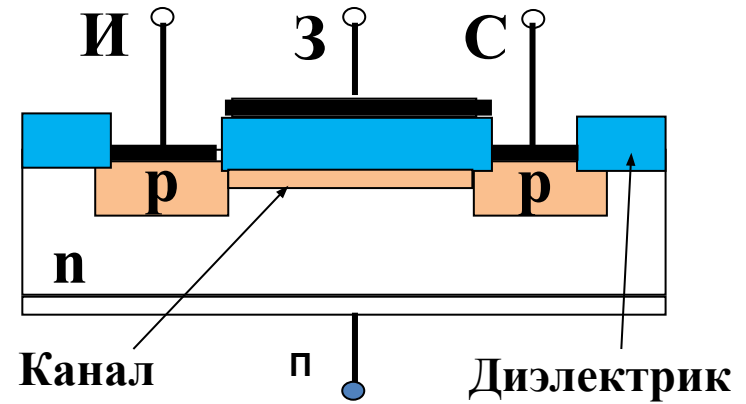


**И** – исток, **С** – сток, **З** – затвор  
Между **С** и **И** расположен p-канал.

Если между **С** и **И** включить источник ЭДС, то по каналу протекает ток, величина которого зависит от сопротивления канала.

При подаче отрицательного напряжения на **З** изменяется ширина n-p перехода, а значит ширина канала и его проводимость

С изолированным затвором (МДП)



Затвор изолирован от канала слоем диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ )  
Между **С** и **И** расположен p-канал.

Канал может быть встроенным и индуцированным. На рисунке – **встроенный**. В зависимости от подаваемого на **З** напряжения в канал из области **n** поступает различное количество дырок, изменяя его проводимость.

# Полевои транзистор с изолированным затвором

- Этот вид транзисторов активно используется в качестве полупроводниковых управляемых ключей. Работают они чаще всего именно в ключевом режиме

(два положения «вкл» и «выкл»).

У них есть несколько названий:

- 1. МДП-транзистор (метал-диэлектрик-полупроводник).
- 2. МОП-транзистор (метал-окисел-полупроводник).
- 3. MOSFET-транзистор (metal-oxide-semiconductor).

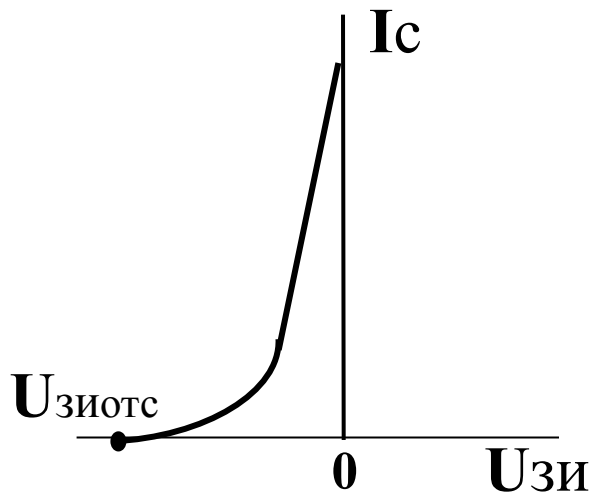
это вариации одного названия

# Вольт-амперные характеристики ПТ

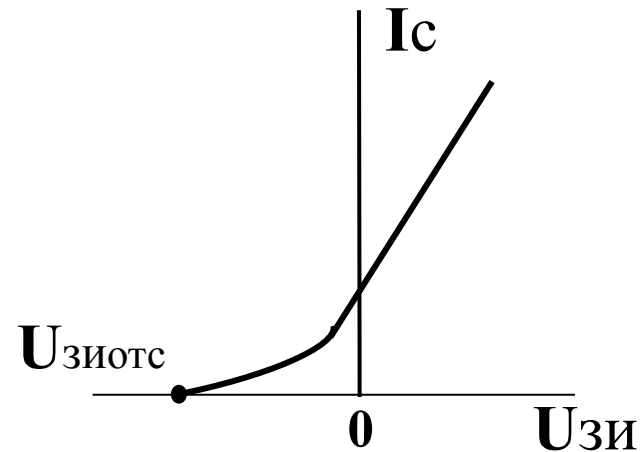
С управляющим n-p переходом

С изолированным затвором  
(МДП) транзисторы

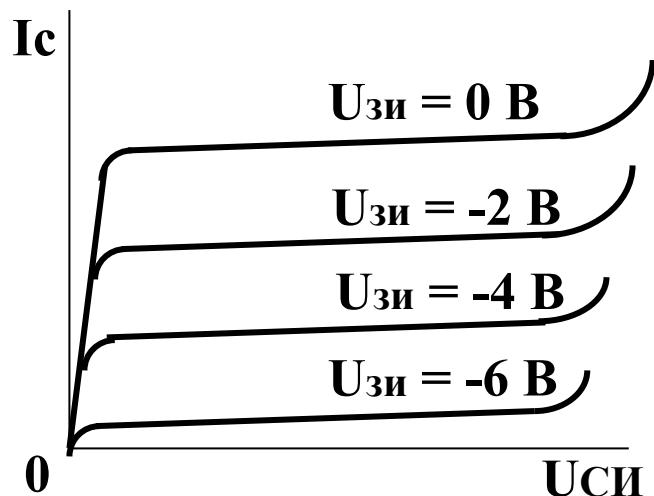
$I_c = F(U_{зи})$  при  $U_{си} = \text{const}$



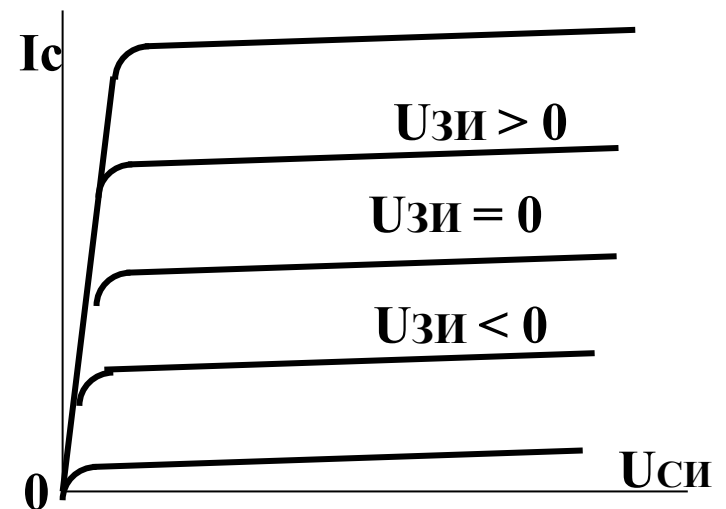
$I_c = F(U_{зи})$  при  $U_{си} = \text{const}$



$I_c = F(U_{си})$  при  $U_{зи} = \text{const}$



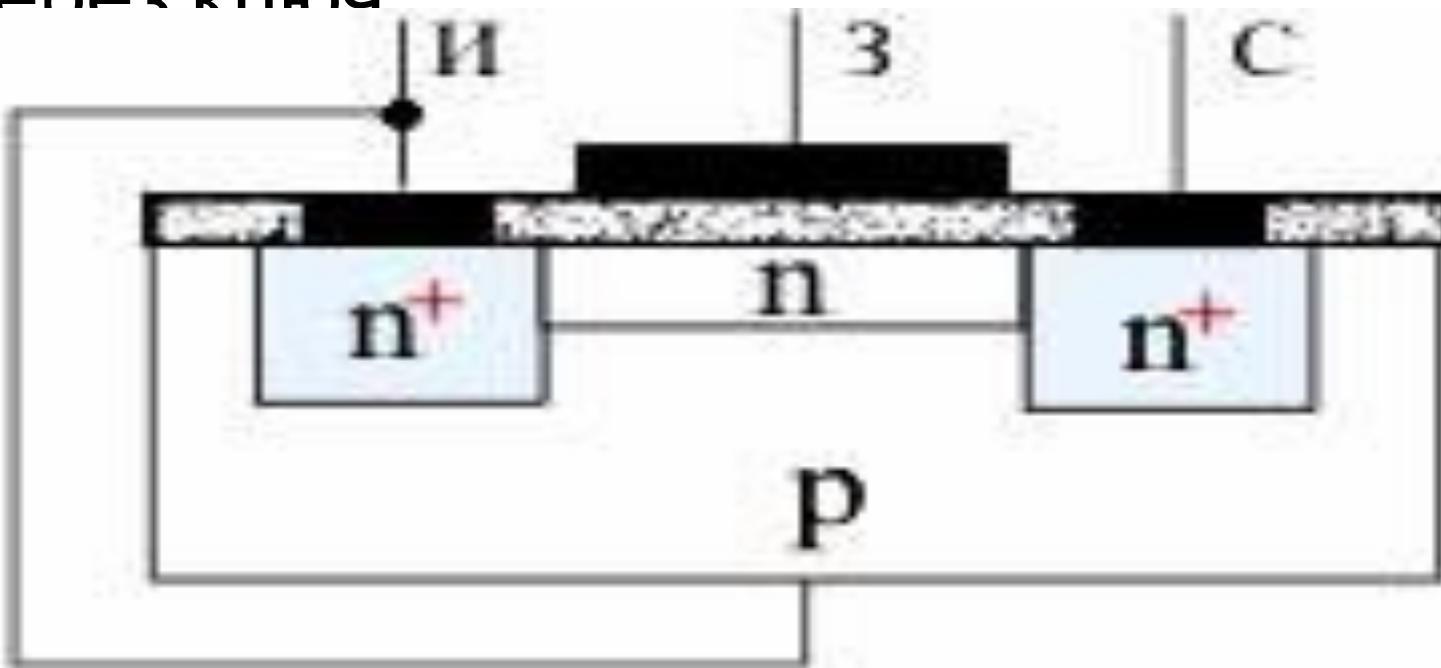
$I_c = F(U_{си})$  при  $U_{зи} = \text{const}$



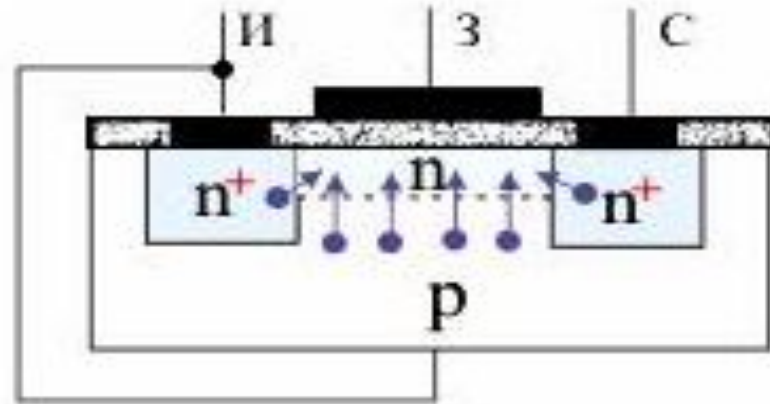


# МДП транзисторы со встроенным каналом

- принцип работы напоминает полевой транзистор с управляющим р-п-переходом, т.е. когда напряжение затвора равно нулю – ток протекает через канал



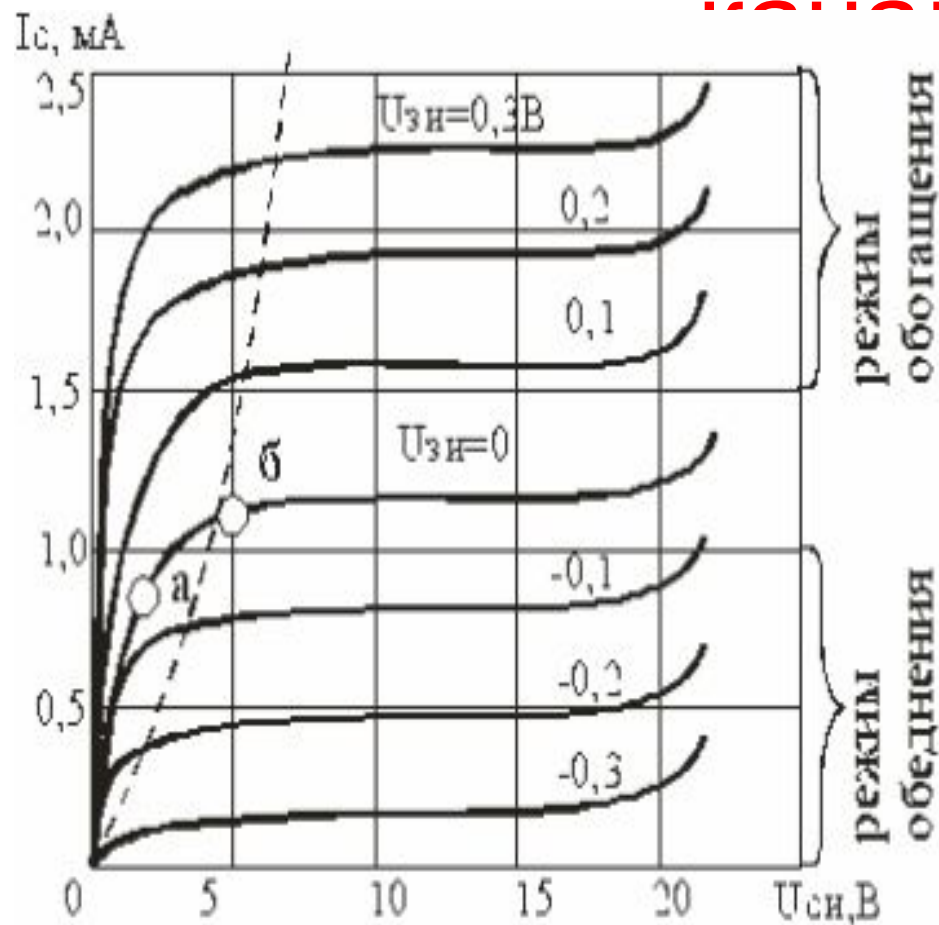
# Режим работы для МОП- транзисторов со встроенным каналом N-типа



- При подаче отрицательного напряжения затвор-исток ток стока падает, транзистор начинает закрываться – это называется **режим обеднения**.
- При подаче положительного напряжения на затвор-исток происходит обратный процесс – электроны притягиваются, ток возрастает. Это **режим обогащения**.

Если канал p-типа все слова «электроны» заменяются на «дырки», полярности напряжения изменяются на

# Характеристики МОП-транзисторов со встроенным каналом



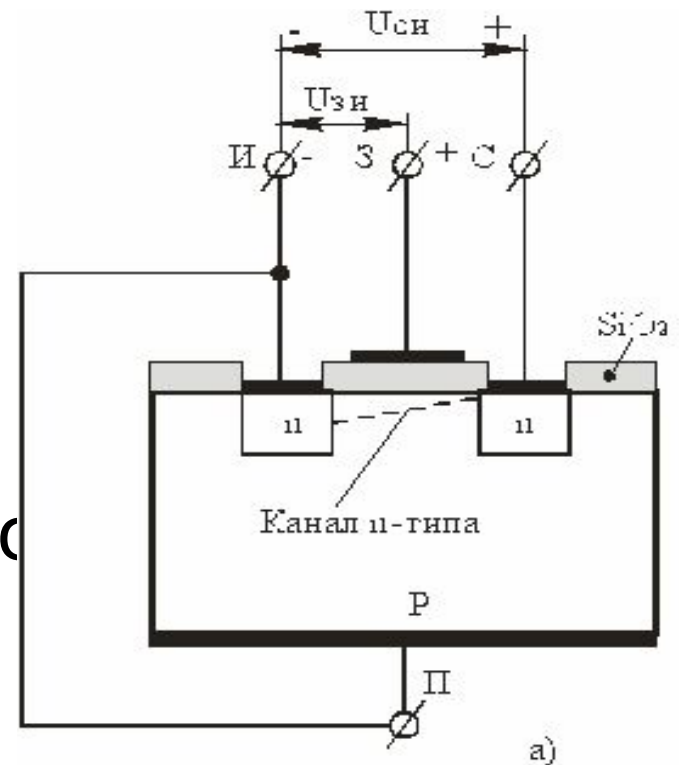
а)



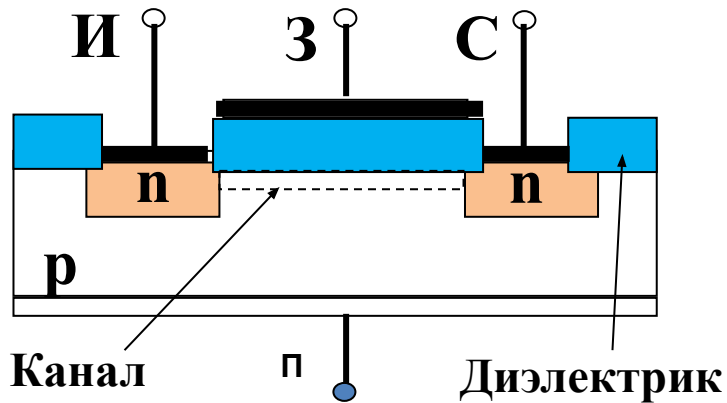
б)

- **МОП-транзисторы с индуцированным каналом** не проводят ток при отсутствии напряжения на затворе, вернее ток есть, но он крайне мал, т.к. это обратный ток между подложкой и высоколегированными участками стока и истока.

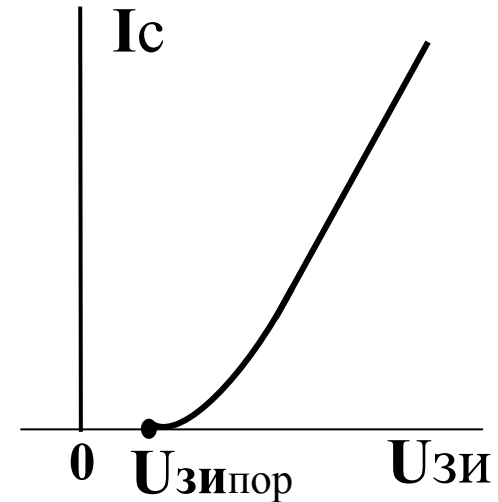
Полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом аналог нормально-разомкнутого ключа, ток не протекает.



# МДП транзисторы с индуцированным каналом

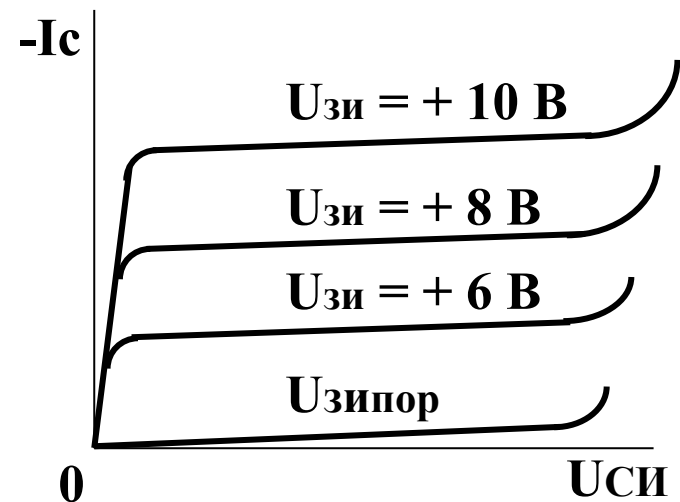


$$I_c = F(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = \text{const}$$



При подаче на затвор положительного напряжения электроны из **p** области притягиваются под затвор, образуя инверсный слой с проводимостью **n**- типа (токопроводящий канал).

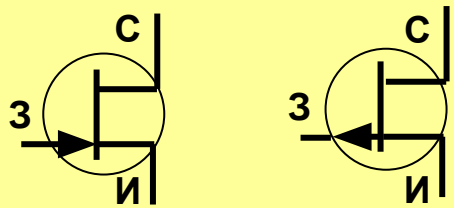
$$I_c = F(U_{си}) \text{ при } U_{зи} = \text{const}$$



При отрицательном и нулевом потенциале на **З** канала не образуется, т.к. между **И** и **С** два обратно смещенных **n-p** перехода.

# Обозначения и схемы включения ПТ

ПТ с управляющим р-п переходом

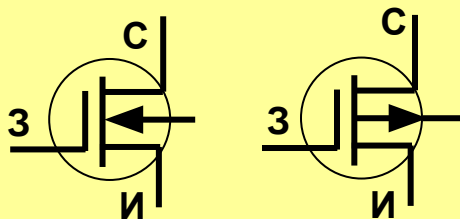


а)

б)

а - для канала n-типа

МДП со встроенным каналом

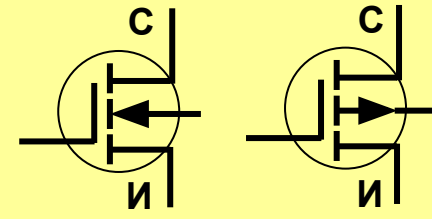


а)

б)

б - для канала р-типа

МДП с индуцированным каналом

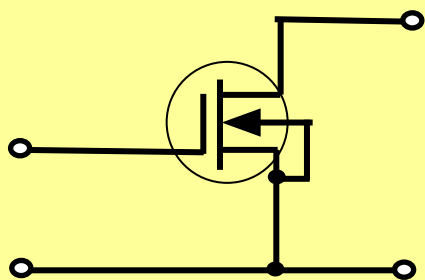


а)

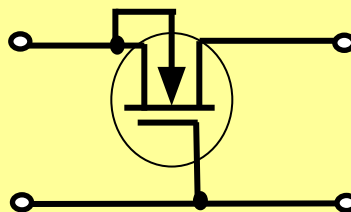
б)

## Схемы включения

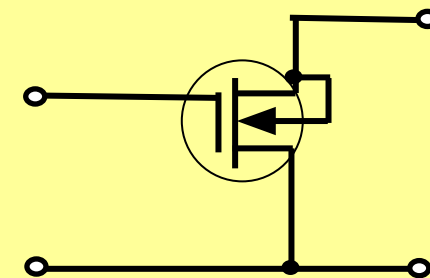
С общим истоком



С общим затвором



С общим стоком



## Предельные параметры ПТ

$U_{ис.мах}$ ,  $U_{зс.мах}$ ,  $P_{тах}$  – предельные напряжения И-С, З-С, мощность.

## Преимущества ПТ

1. **Высокое входное сопротивление**, благодаря чему практически не потребляется входной ток и расходуется крайне мало энергии.

2. **Выше**, чем у БПТ **помехоустойчивость и надежность** работы в схемах, поскольку из-за отсутствия тока через затвор транзистора, управляющая цепь со стороны затвора изолирована от выходной цепи со стороны стока и истока.

3. У ПТ на порядок **выше скорость перехода** между состояниями **проводимости и непроводимости** тока. Поэтому они могут работать на более высоких частотах, чем биполярные.

## Недостатки ПТ

1. **Чувствительность к статическому электричеству** из-за малой толщины изоляционного слоя диэлектрика на затворе. Относительно **невысокого напряжения** бывает достаточно, чтоб его **разрушить**.

2. Имеют **большее** падение напряжения в **открытом** состоянии, чем БПТ, что увеличивает расход мощности.



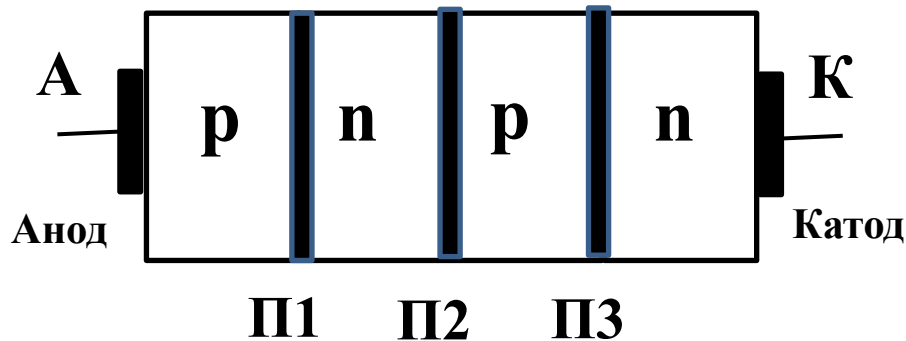


# ТИРИСТОРЫ

# Тиристоры

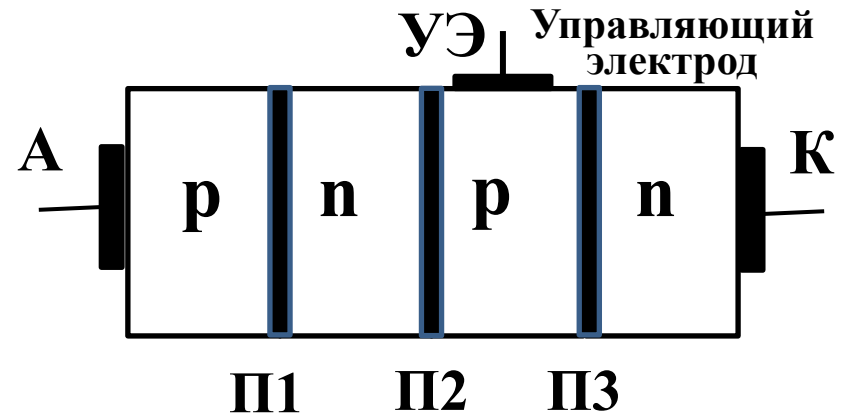
Тиристор – полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями и тремя или более последовательно включенными **p-n** переходами (П1, П2, П3).

Диодный тиристор



Принцип работы

Триодный тиристор



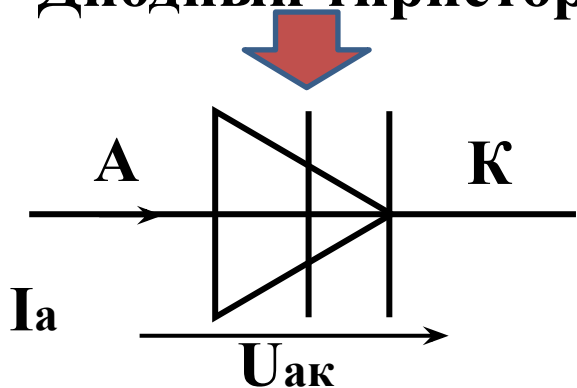
При плавном увеличении напряжения ( $U$ ) на электродах (+ к **А**, - к **К** → П1 и П3 - открыты, П2 - закрыт) тиристор закрыт, ток мал.

При достижении  $U$ , равном  **$U_{вкл}$** , П1, П2, П3 открыты, тиристор включается, ток резко возрастает.

При уменьшении  $U$  процессы происходят в обратном порядке и при  **$U_{выкл}$**  тиристор выключается. Подавая напряжением на УЭ (+  $U_{упр}$ ) можно изменять  **$U_{вкл}$** .

# Условное обозначение, вольт-амперные характеристики и параметры тиристоров

## Диодный тиристор



$I_a$

$U_{ак}$

$$I_a = F(U_a)$$

$I_a$

$I_{уд}$

Выключаются тиристоры обратным напряжением  $U_{ак}$

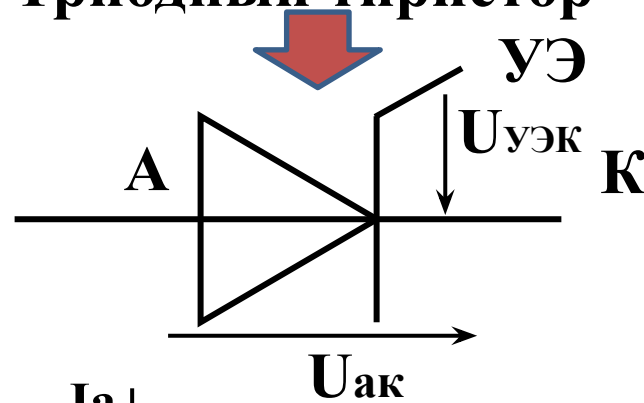
0

$U_{выкл}$

$U_{вкл}$

$U_{ак}$

## Триодный тиристор



A

УЭ

K

$U_{ак}$

$I_a$

$I_{адоп}$

Триодный тиристор включают по УЭ

$U_{уэ2} > U_{уэ1}$

$I_{уд}$

$U_{обрдоп}$

$U_{вкл2}$

$U_{вкл1}$

$U_{ак}$

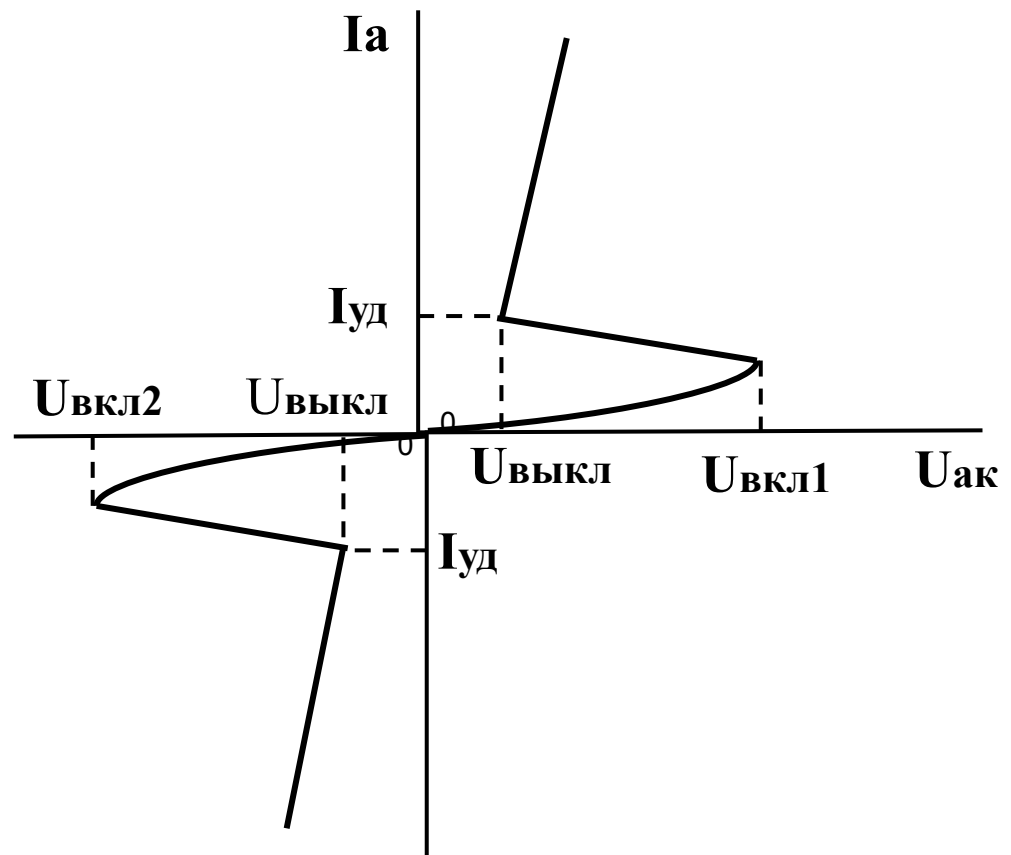
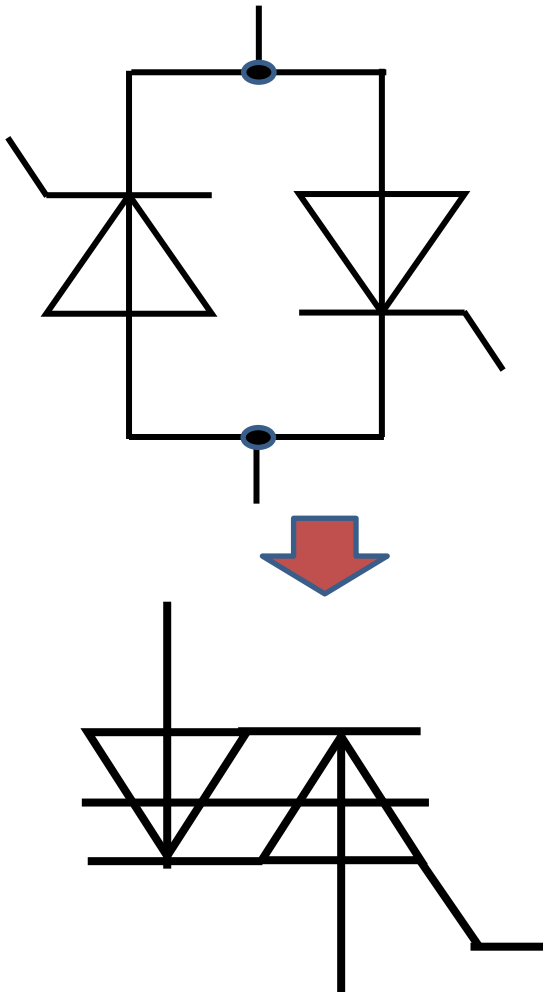
$U_{обрдоп}$  – наибольшее напряжение, которое может быть приложено в обратном направлении.

$I_{а.доп}$  – наибольшее значение постоянного анодного тока в открытом состоянии прибора.

$U_{у.от}$  – напряжение между УЭ и К, соответствующее отпирающему току УЭ.

# Симметричные триодные тиристоры (триаки или симисторы)

ЭТО тиристоры, которые могут переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот при любых полярностях напряжения на основных электродах (**А** и **К**)

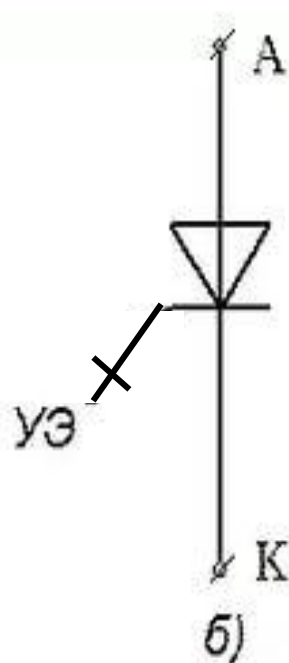
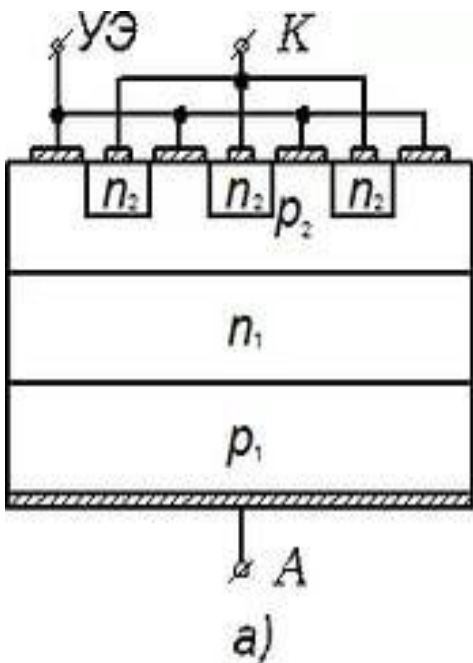


# Запираемый тиристор

Запираемый тиристор - полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого классическая четырёхслойная структура.

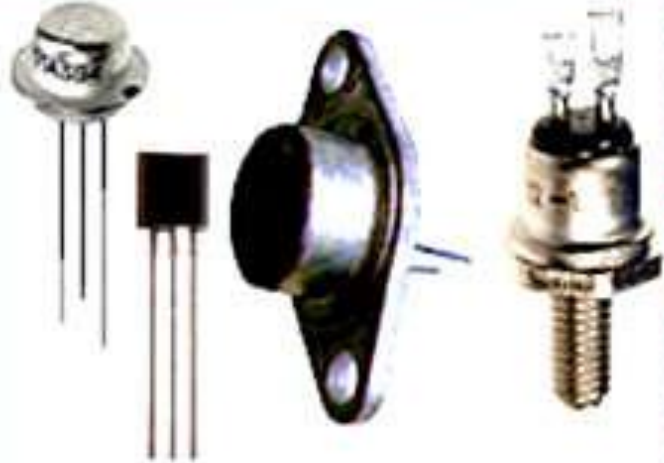
Включают и выключают его подачей положительного и отрицательного импульсов тока на электрод управления.

На рисунке приведены структурная схема (а) и условное обозначение (б) выключаемого тиристора. Подобно обычному тиристорам он имеет катод К, анод А, управляющий электрод УЭ

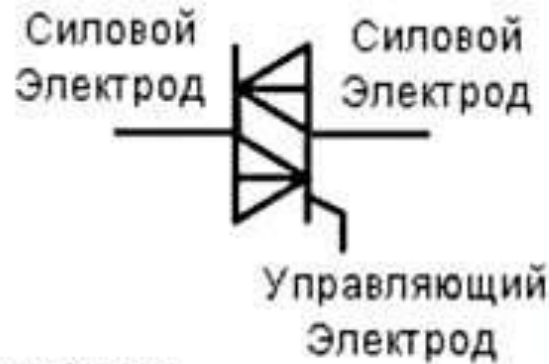


**Катодный слой  $n$  разбит на несколько сотен элементарных ячеек, равномерно распределённых по площади и соединённых параллельно, что позволяет обеспечить равномерное снижение тока по всей площади полупроводниковой структуры при выключении прибора.**

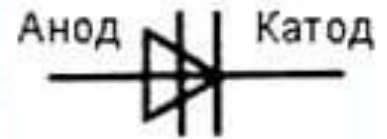
# Внешний вид тиристоров



тиристоры



симисторы



динисторы

Пример: КУ202Н кремниевый триодный тиристор,  $U_{обр.доп} = 400 \text{ В}$ ,  $I_{адоп} = 10 \text{ А}$ ,  $U_{у.от} \leq 7 \text{ В}$

