

**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**.

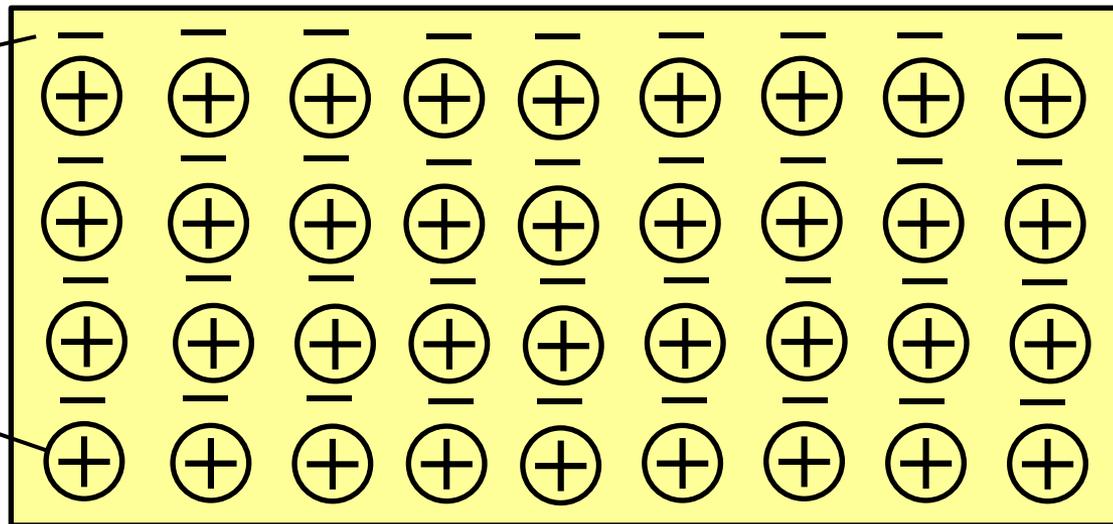
Примесные полупроводники

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

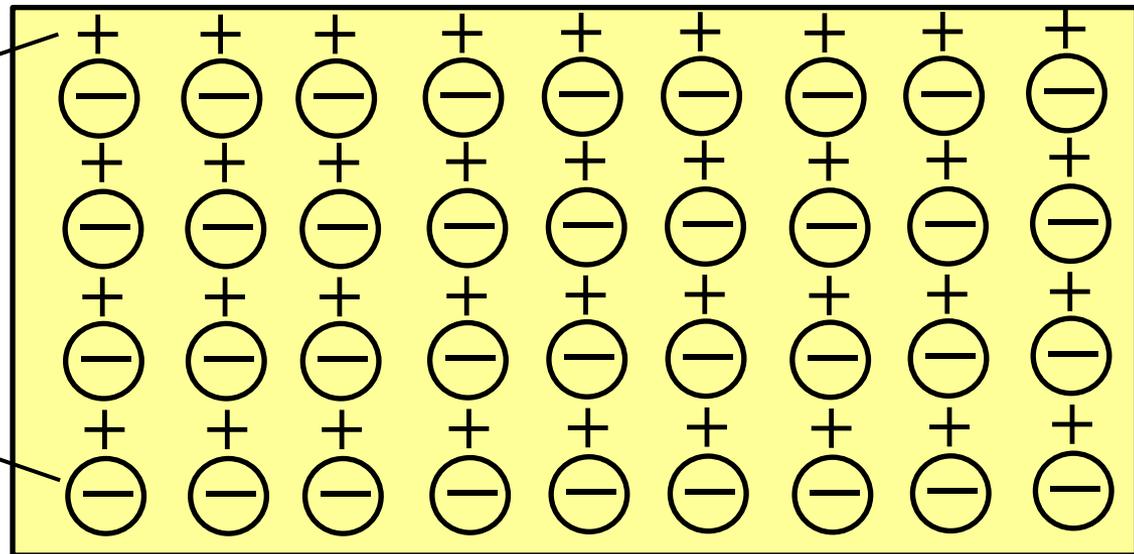
При добавлении в четырехвалентный полупроводник (Si) трехвалентного элемента (индий In) в структуре примесного полупроводника образуются положительные подвижные заряды - «дырки», при этом атомы индия становятся неподвижными отрицательными ионами.

Такой полупроводник называют полупроводником с дырочной проводимостью или полупроводником

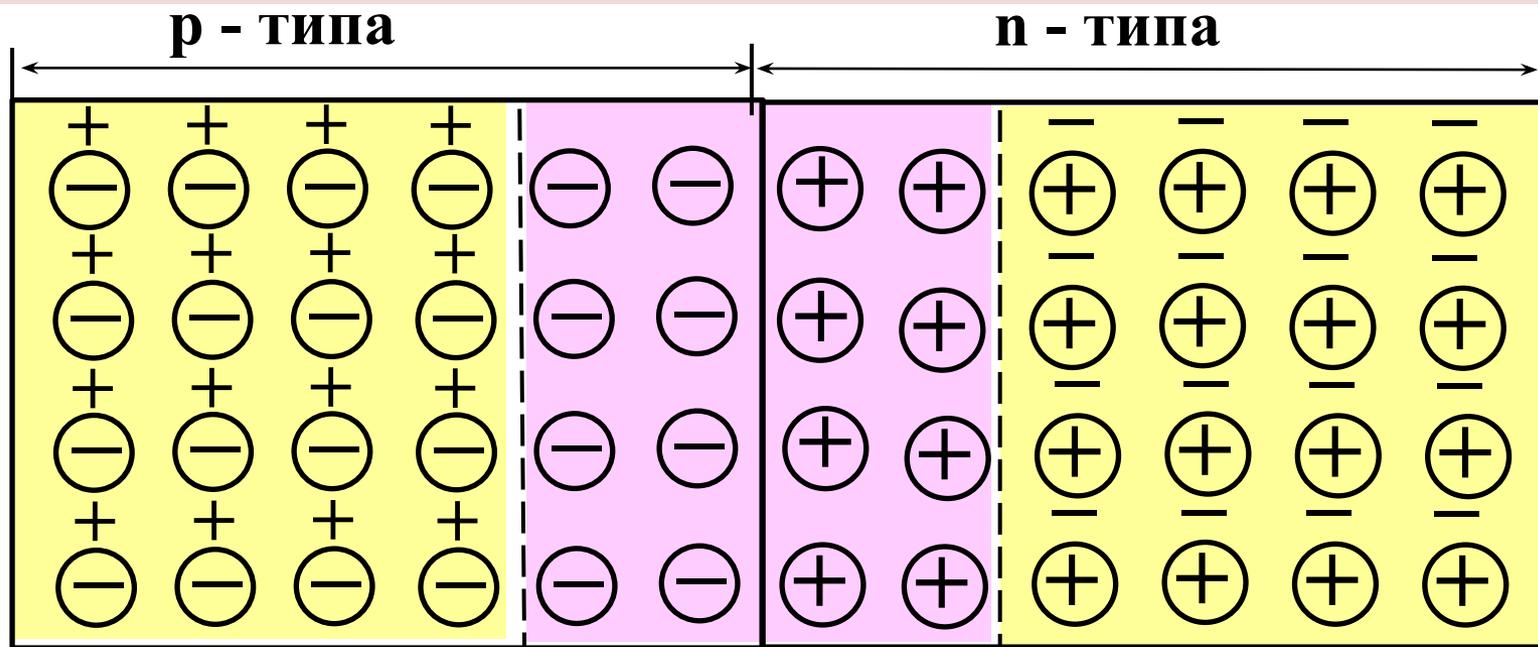
р-типа.

Свободная
дырка

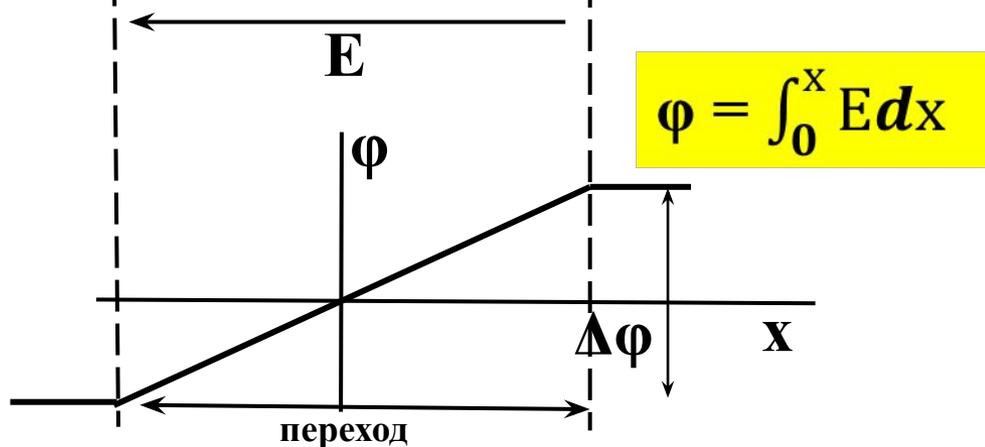
Неподвижный
ион



Контактные явления на границе полупроводников p и n типа

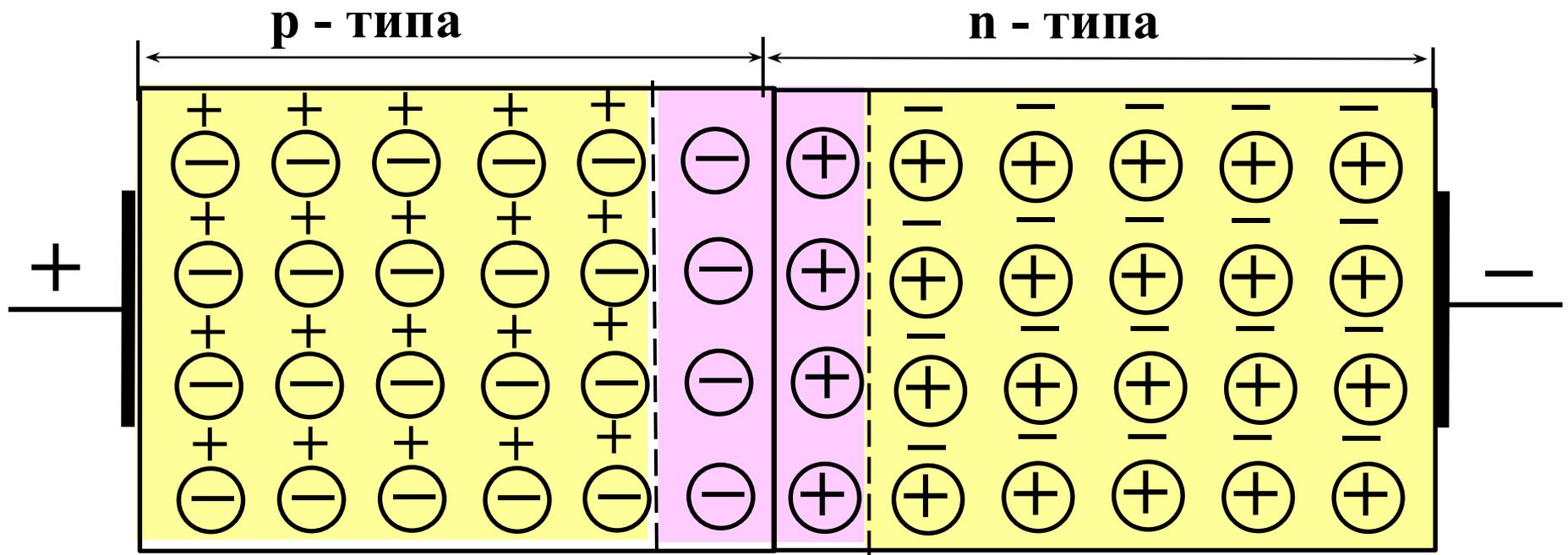


При соединении полупроводников **p** и **n** типов часть дырок диффундирует из **p** области в **n** область, а электронов из **n** в **p** область.

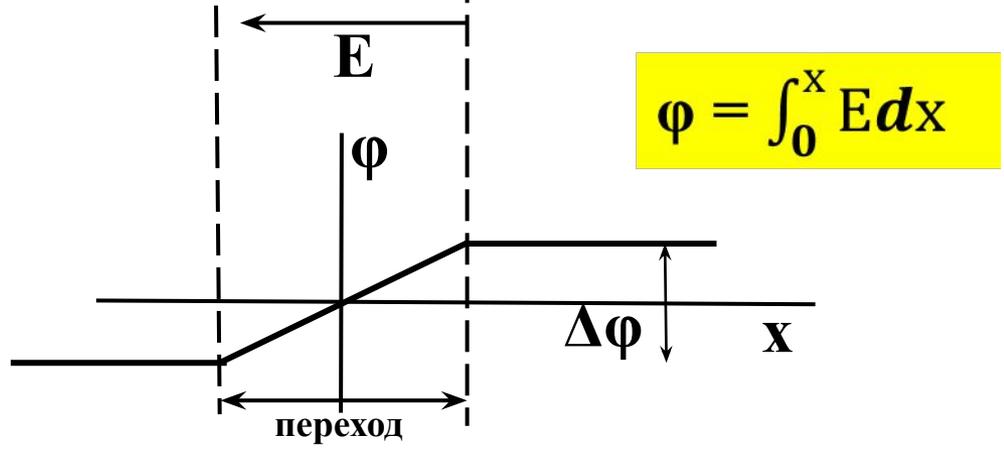


Вдоль границы раздела двух полупроводников возникли слои неподвижных отрицательных и положительных ионов. Возникшее между этими слоями поле (E) препятствует дальнейшей диффузии дырок и электронов. При некотором значении E ток через переход прекращается.

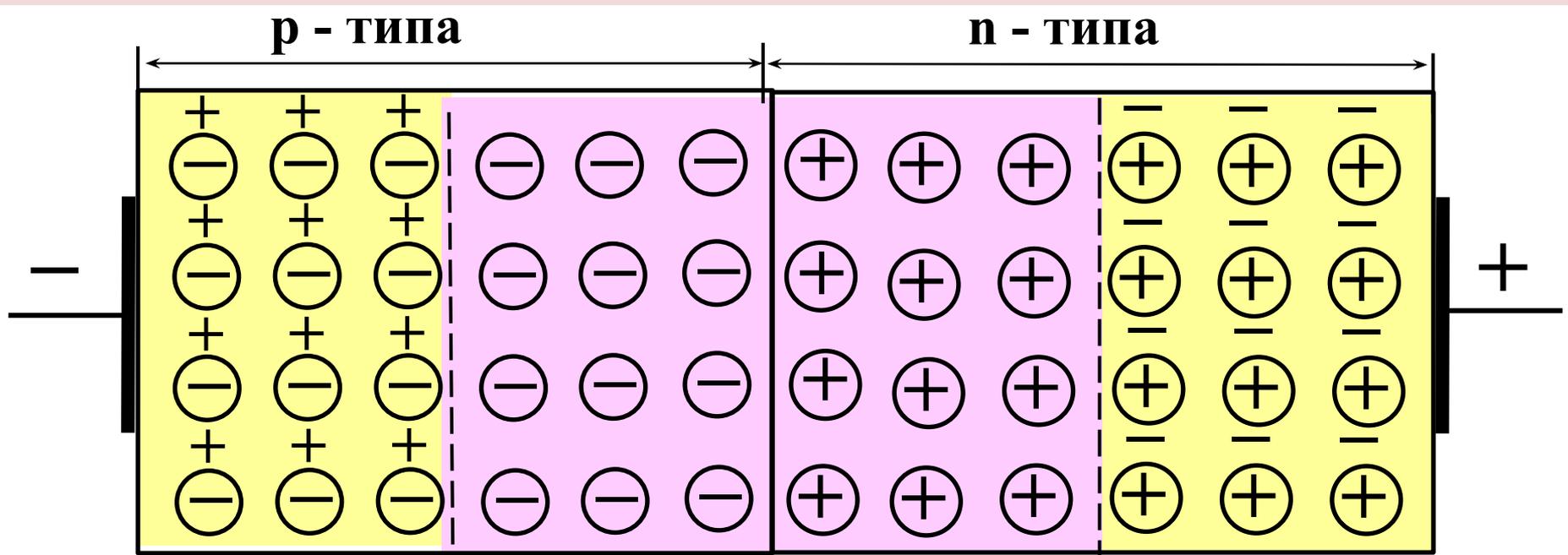
р-п переход под воздействием внешнего напряжения



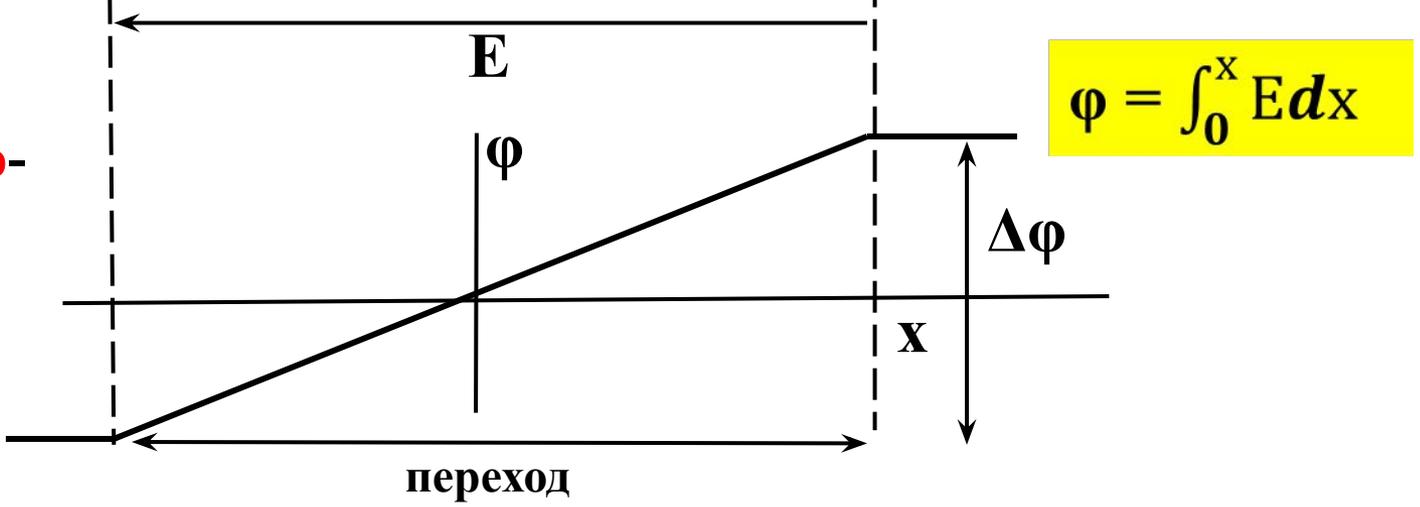
При подаче положительного напряжения (+ к р-области, - к n области) высота потенциального барьера $\Delta\phi$ уменьшается и через переход протекает ток – прямой ток перехода.



p-n переход под воздействием внешнего напряжения



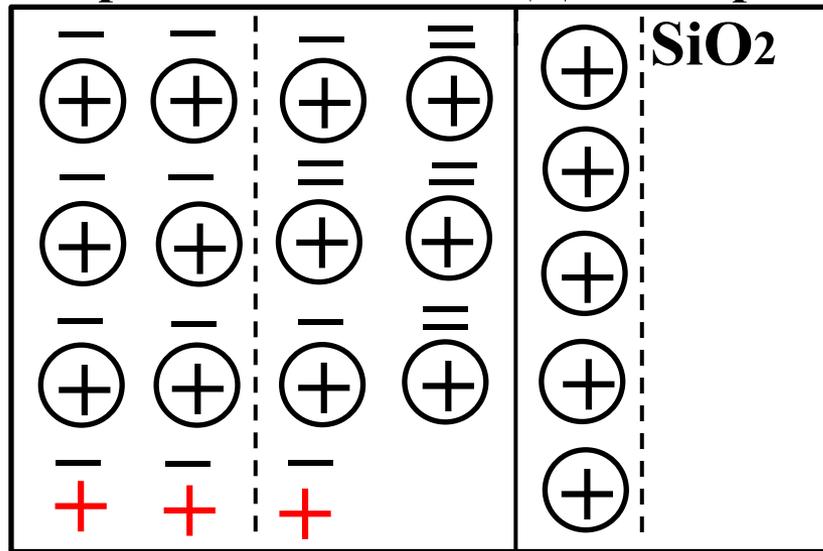
При подаче отрицательного напряжения (- к p-области, + к n-области) высота потенциального барьера $\Delta\phi$ увеличивается, ток через переход очень мал – обратный ток.



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



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

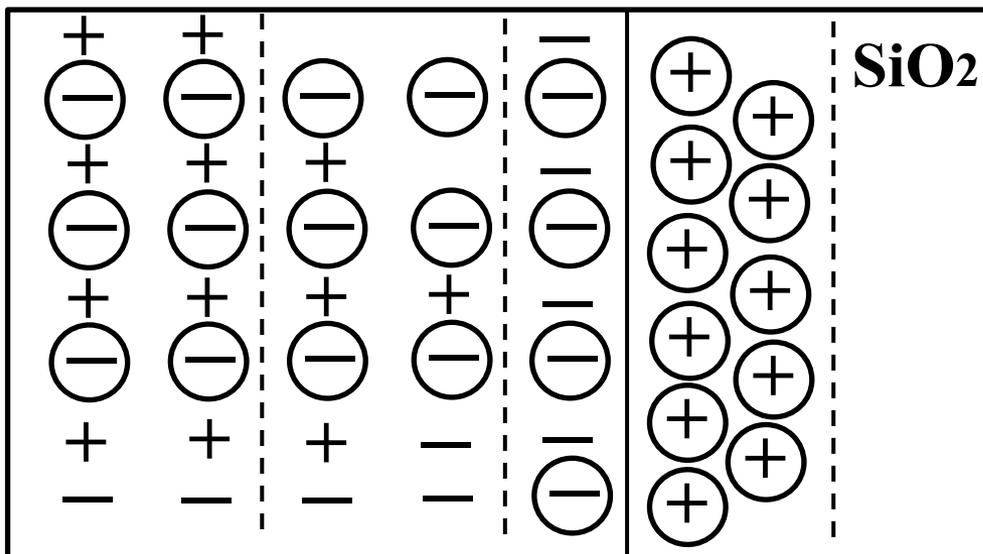
Диэлектрик

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.

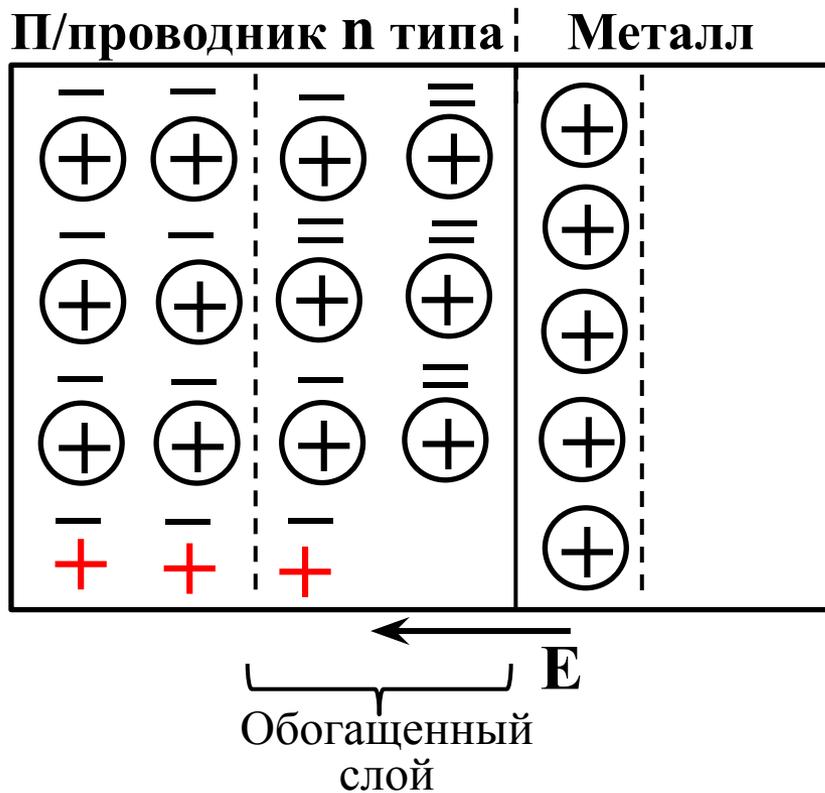


Обедненный слой Инверсный слой

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.

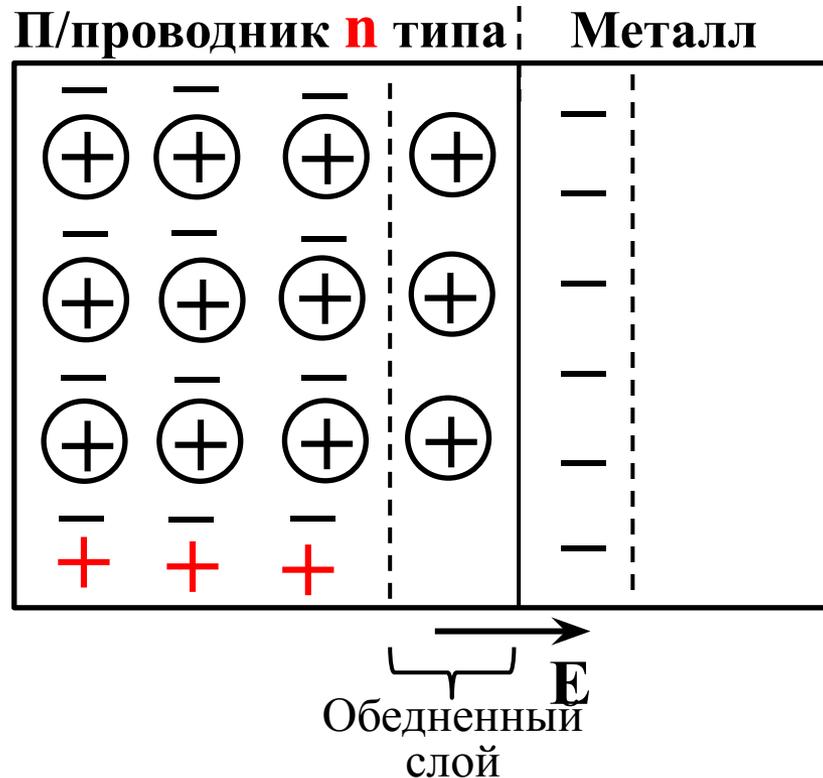
Контактные явления на границе полупроводника и металла



Если потенциал выхода для металла ϕ_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 ϕ_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 р-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 р-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 р-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 p-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

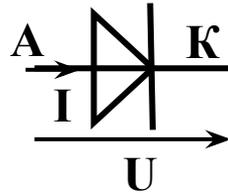
Выпрямительные диоды

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

Обозначение на схемах:

Анод - А

Катод - К

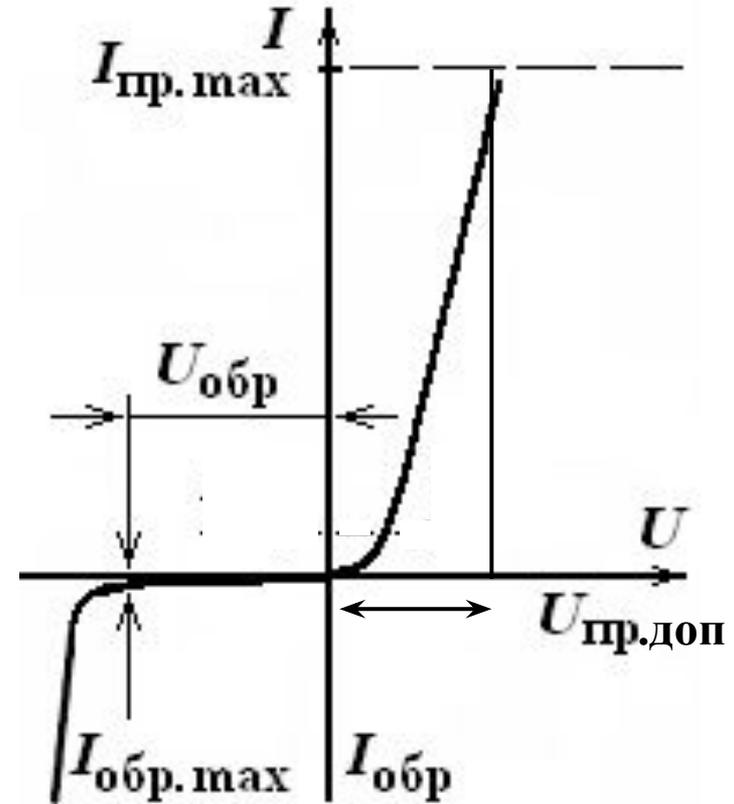


Параметры:

Допустимый прямой ток $I_{\text{пр.маx}}$ 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 $I_{\text{обр.маx}}$

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

По частоте

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

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

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

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.

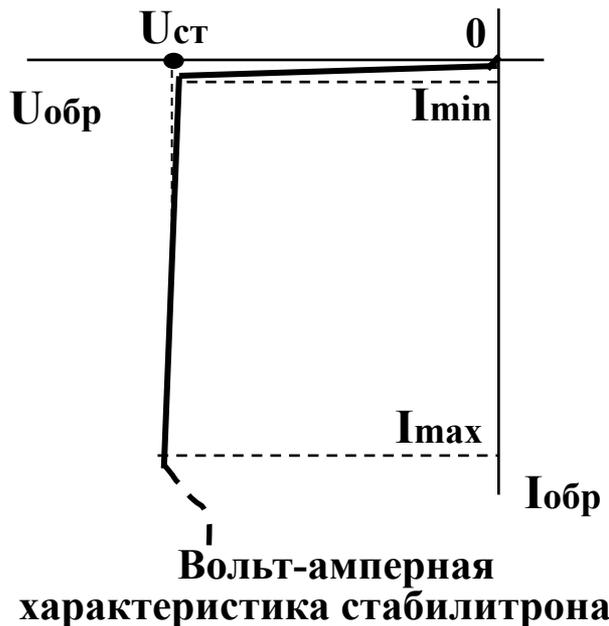
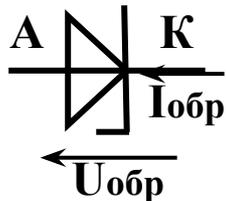
Область применения, с помощью импульсных диодов можно сконструировать электронный ключ, генератор, модулятор и

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:

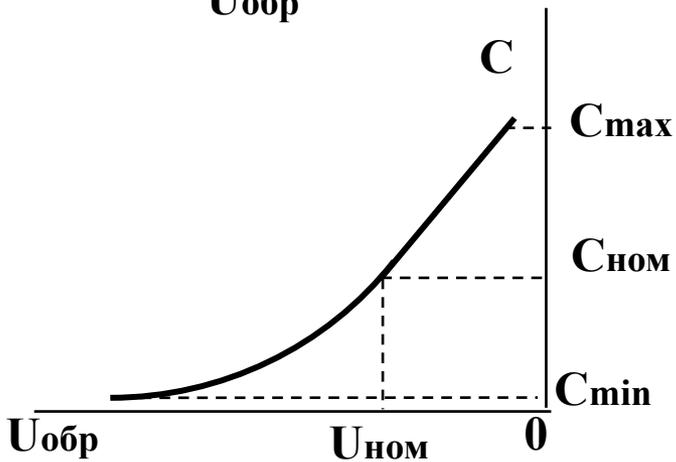
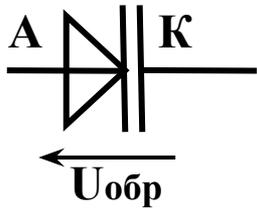
1. $U_{ст}$ – напряжение стабилизации (единицы, десятки вольт).
2. I_{min} , I_{max} – минимальный и максимальный ток стабилизации.
3. P_{max} - максимально допустимая рассеиваемая мощность.
4. $TKH = \Delta U / (U_{ст} \Delta T)$ – температурный коэффициент напряжения стабилизации (ΔU – отклонение напряжения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

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-фарадная характеристика варикапа

Основные параметры:

1. **C_{ном}** – номинальная емкость варикапа при номинальном смещении
2. **C_{min}** – минимальная емкость варикапа при заданном минимальном смещении
3. **C_{max}** – максимальная емкость варикапа при заданном максимальном смещении
4. **K_T** – 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**.

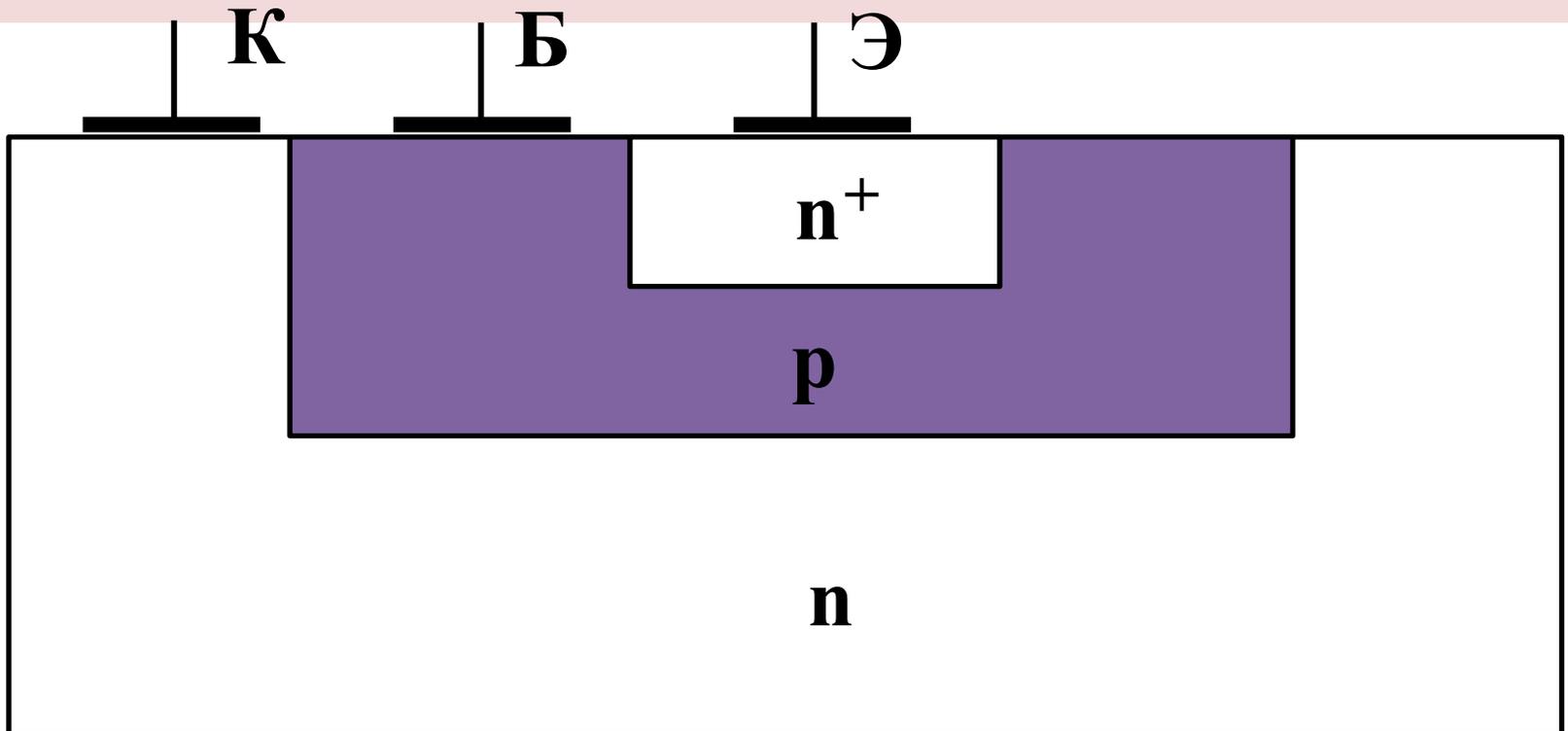
Основной способ движения носителей - это **дрейф** носителей в электрическом поле

Биполярные транзисторы

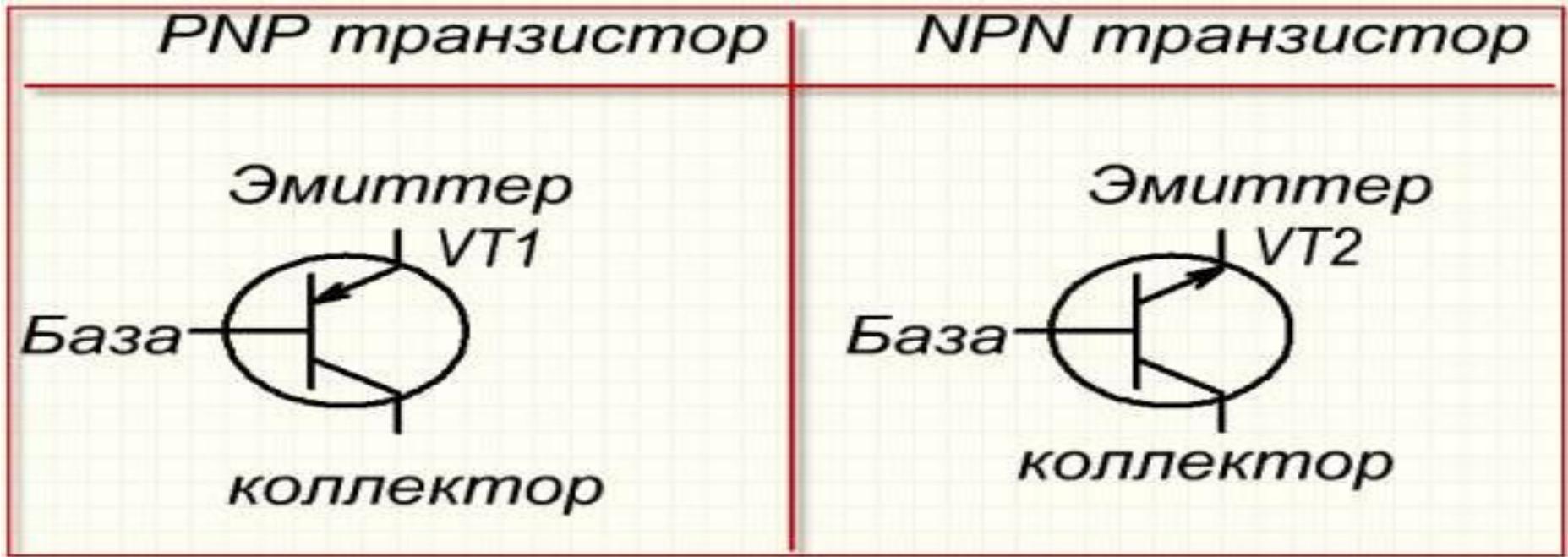
Конструктивное исполнение БПТ

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.



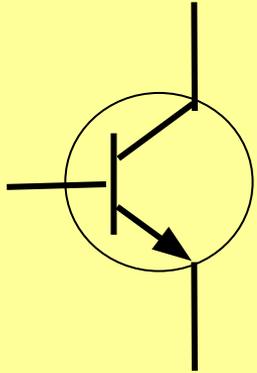
Биполярные транзисторы имеют три вывода и конструктивно выглядят совершенно по-разному, но на электрических схемах они выглядят всегда одинаково.



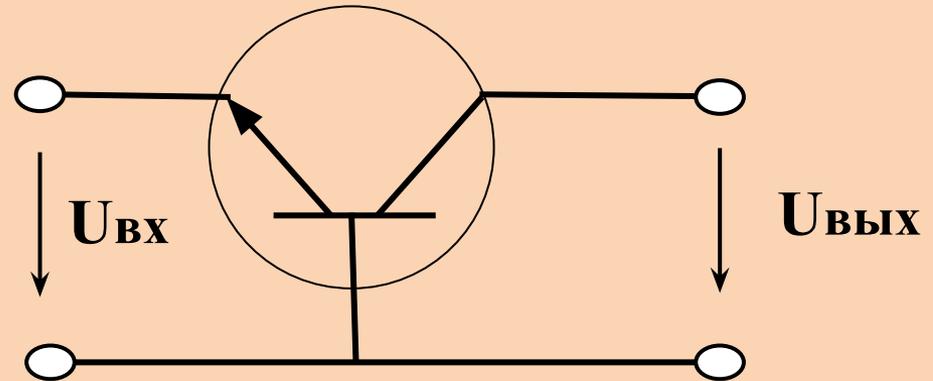
Это изображение называют УГО
(Условное графическое обозначение)

Обозначение и схемы включения БПТ

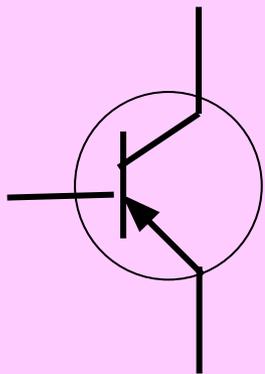
п-р-п типа



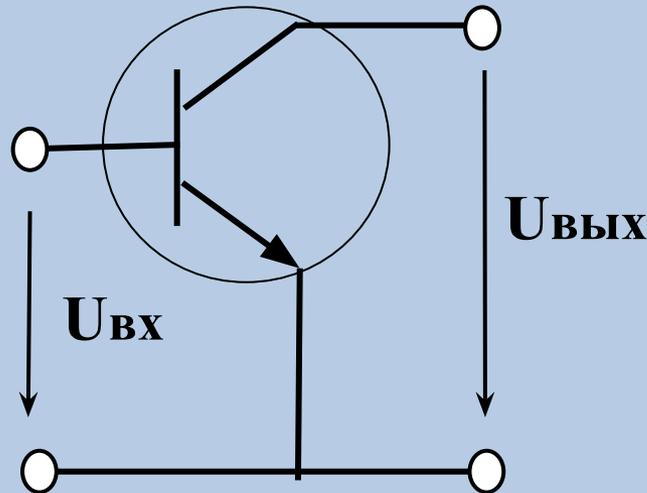
С общей базой



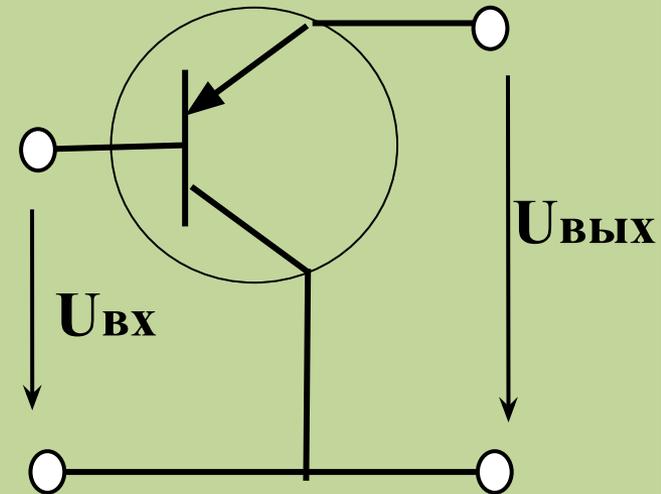
р-п-р типа



С общим эмиттером



С общим коллектором

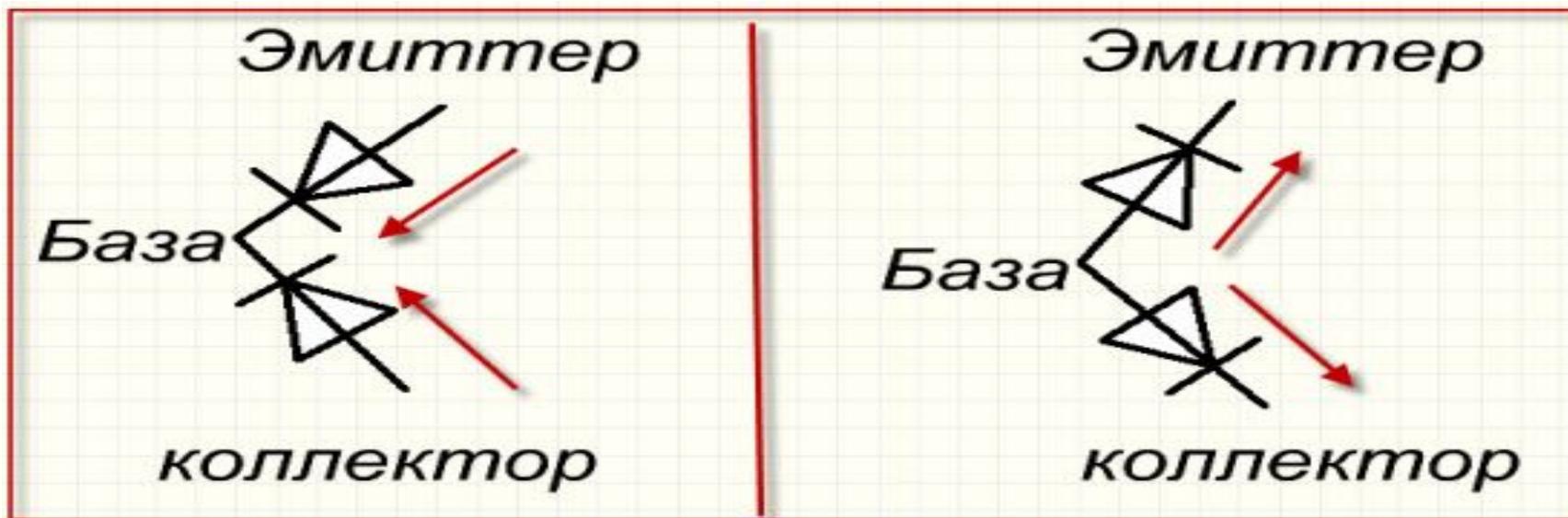


Отличие n-p-n транзистора от p-n-p транзистора

- 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.

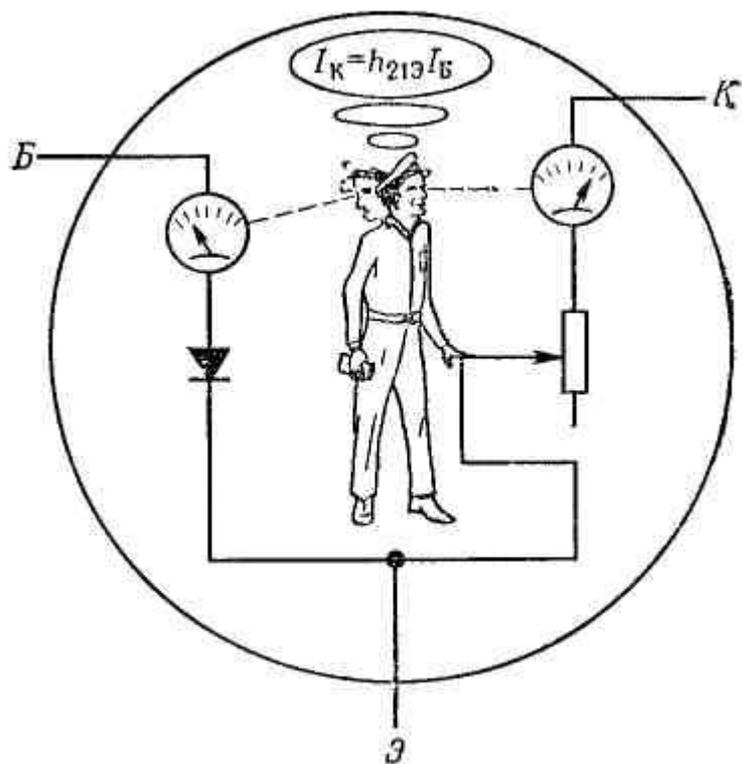
Вывод: для того чтобы в схеме заменить транзистор одного типа проводимости на другой достаточно изменить полярность приложенного

- 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. β

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

Параметры транзистора:

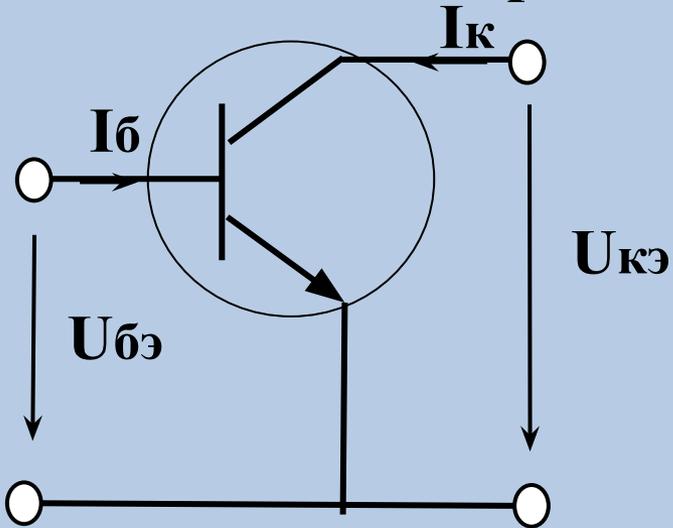
1. $\alpha = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{э}}$ - коэффициент передачи эмиттерного тока;
2. $\beta = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}}$ - коэффициент передачи тока базы.

Полный ток коллектора $I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{к0}}$,

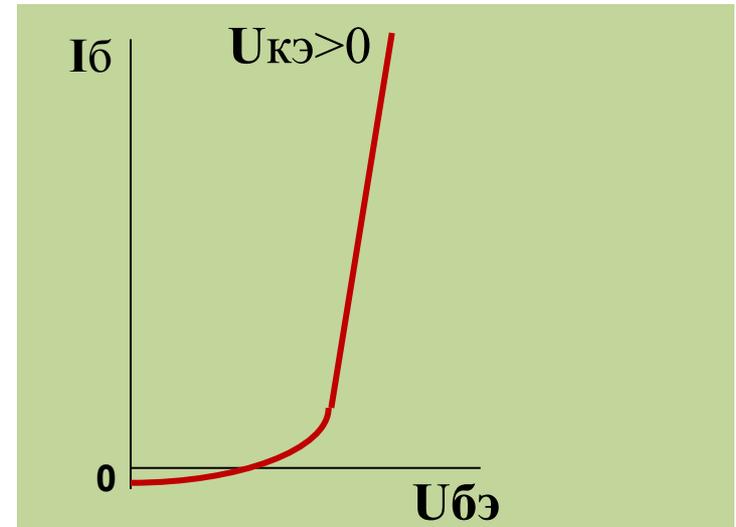
где $I_{\text{к0}}$ – тепловой ток коллекторного перехода

Вольтамперные характеристики БПТ

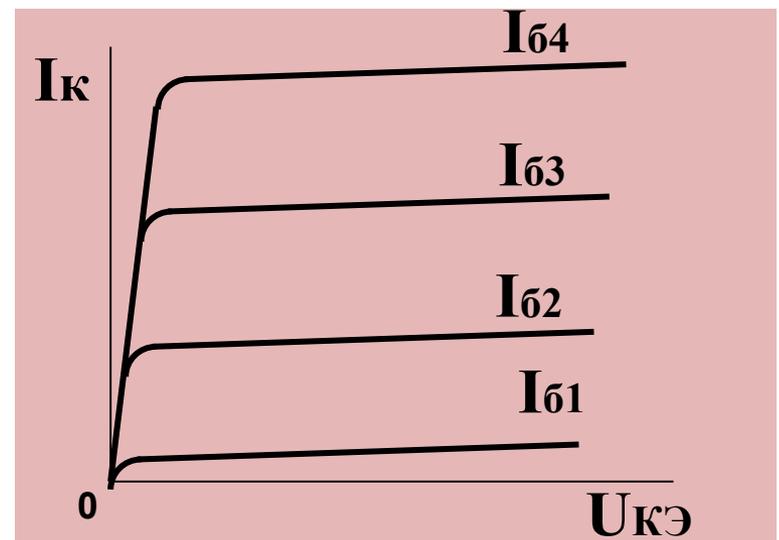
С общим эмиттером



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



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



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

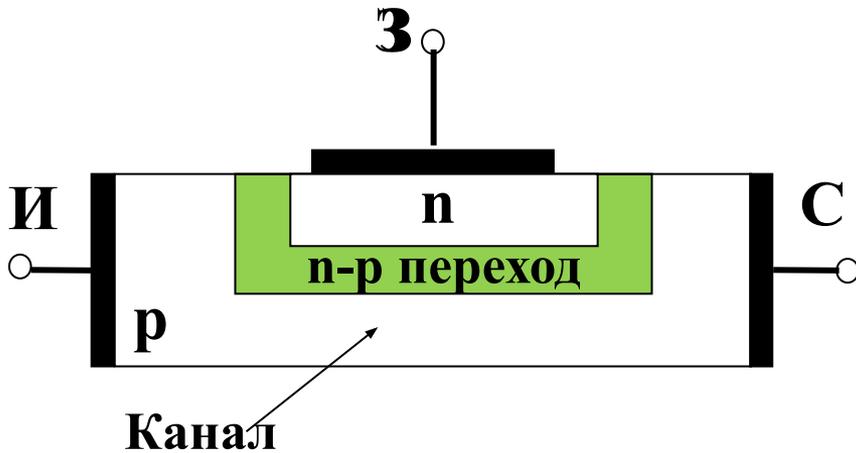
- **Полевой транзистор** – это полупроводниковый полностью управляемый ключ, управляемый электрическим полем. Электрическое поле создается напряжением, приложенным к затвору относительно истока. Полярность управляющего напряжения зависит от типа канала транзистора.
- *Это главное отличие с точки зрения 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



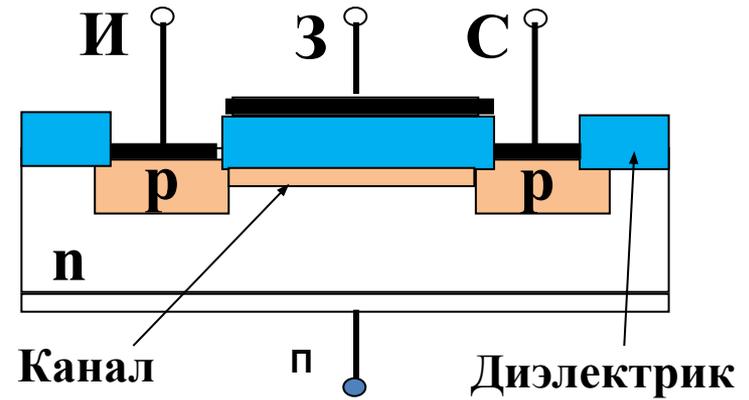
И – исток, **С** – сток, **З** – затвор

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 (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).

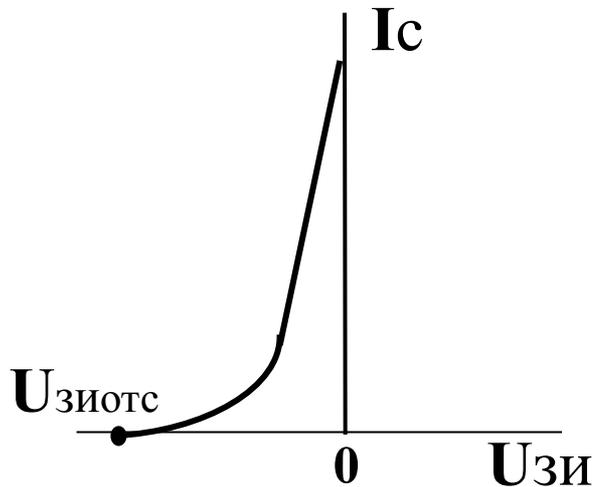
это вариации одного названия

Вольт-амперные характеристики ПТ

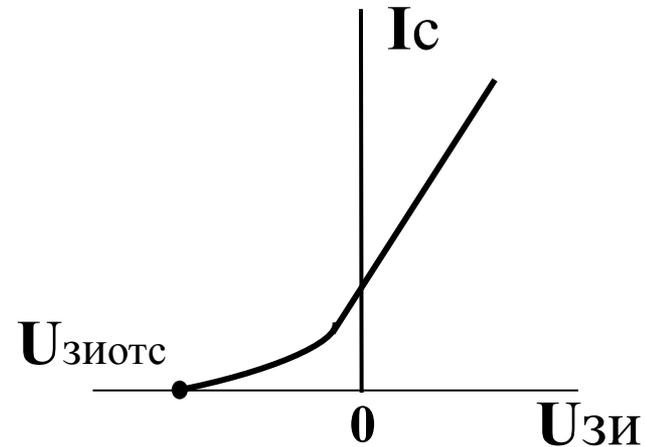
С управляющим n-p переходом

С изолированным затвором
(МДП) транзисторы

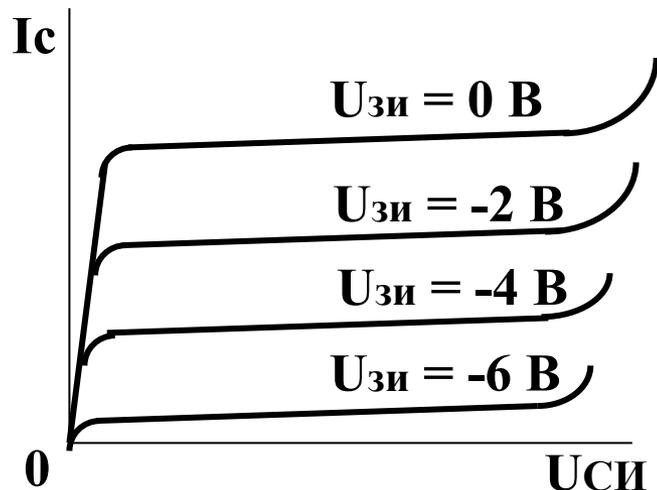
$$I_c = F(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = \text{const}$$



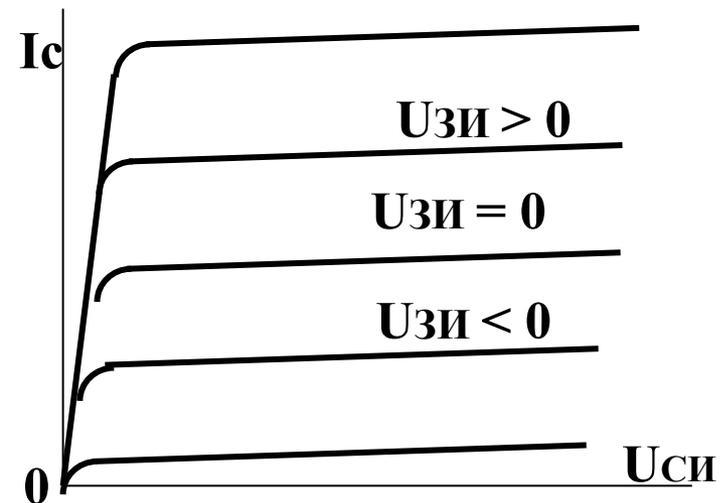
$$I_c = F(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = \text{const}$$



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

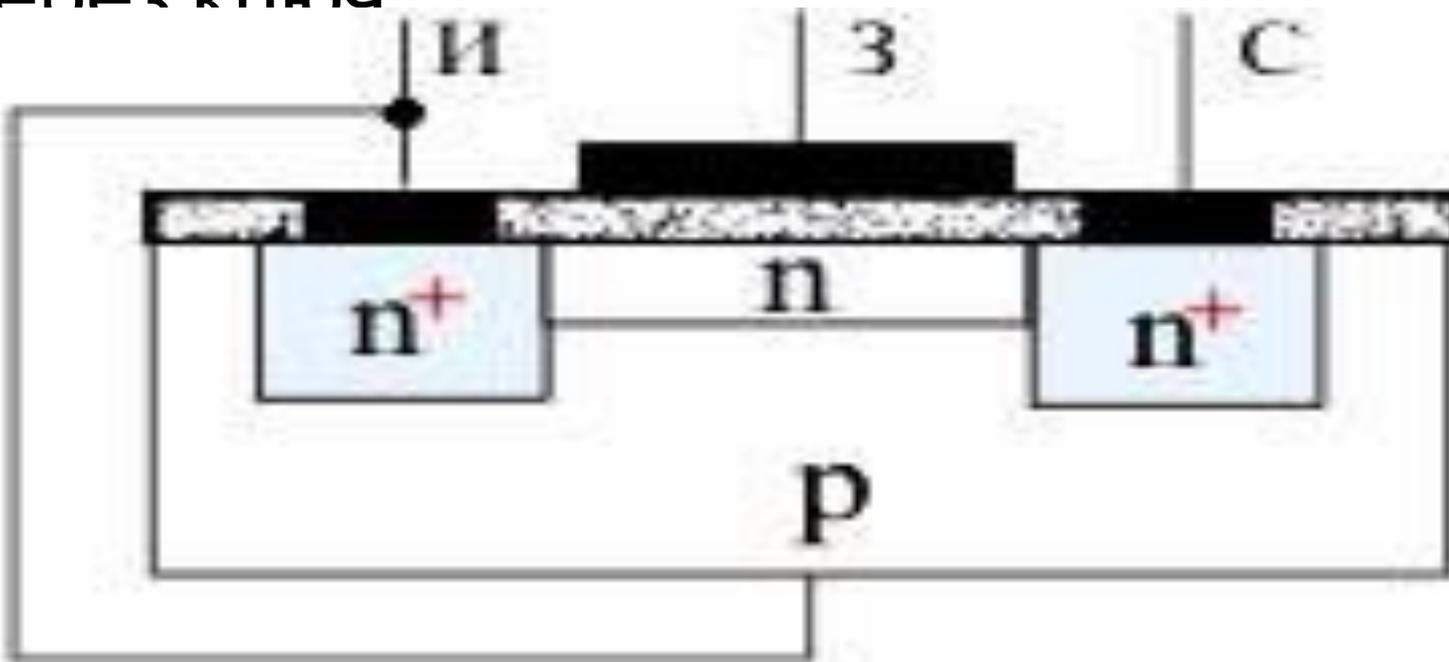


$$I_c = F(U_{си}) \text{ при } U_{зи} = \text{const}$$

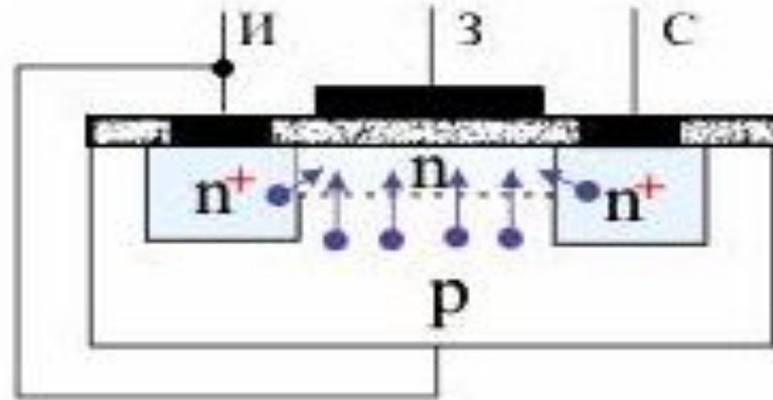


МДП транзисторы со встроенным каналом

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



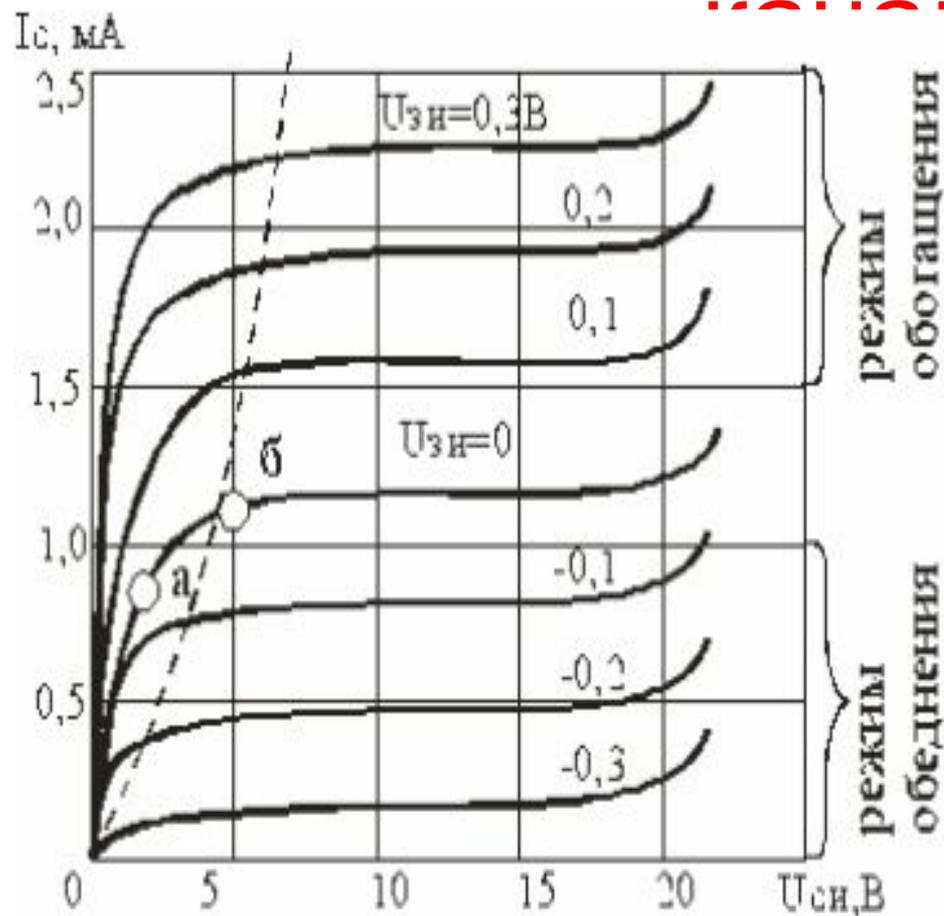
Режим работы для МОП- транзисторов со встроенным каналом N-типа



- 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



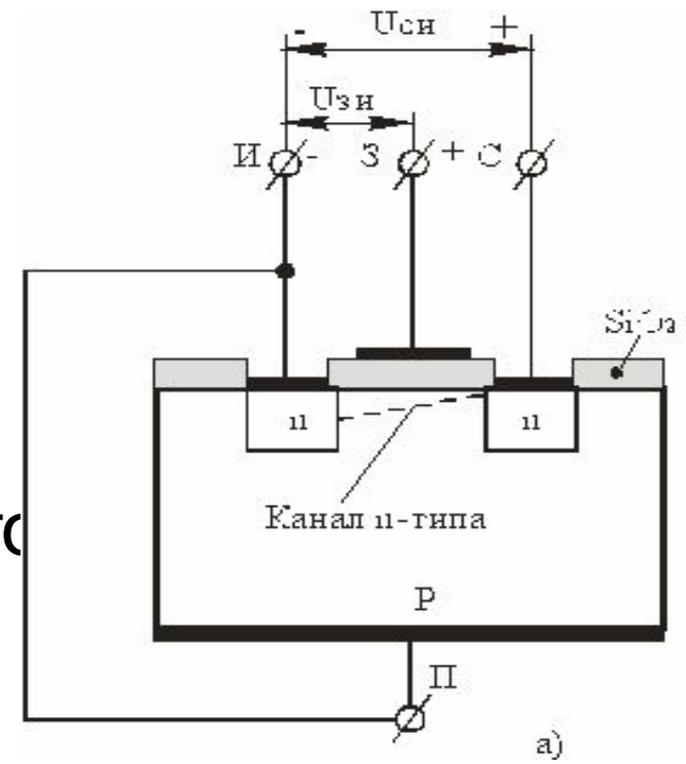
а)



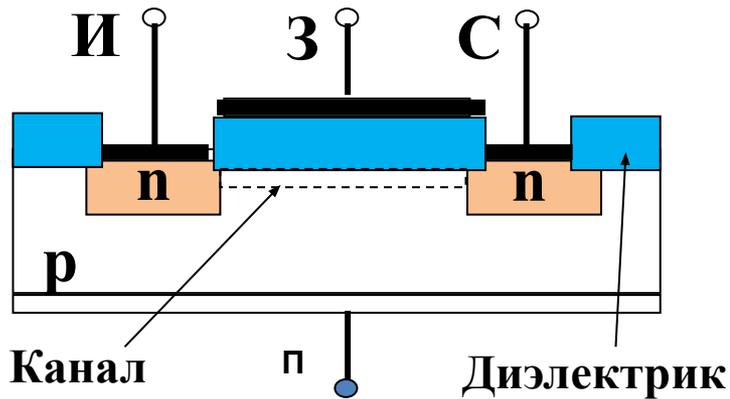
б)

- **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.

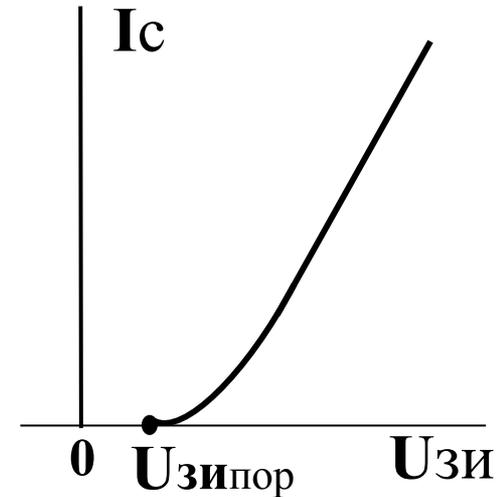
Полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом аналог нормально-разомкнутого ключа, ток не протекает.



МДП транзисторы с индуцированным каналом

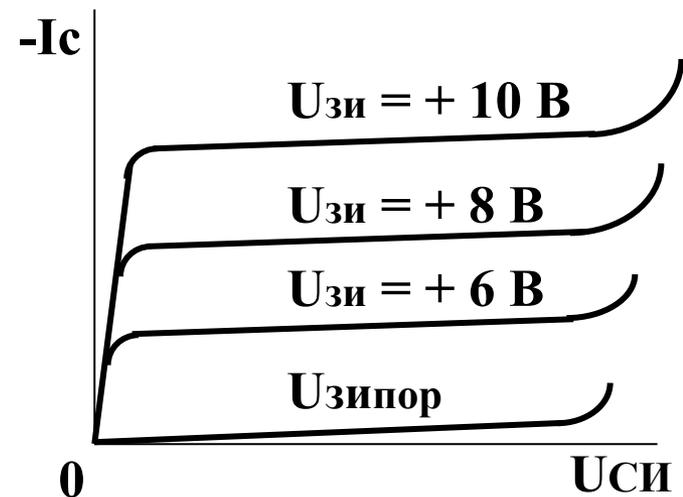


$$I_c = F(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = \text{const}$$



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

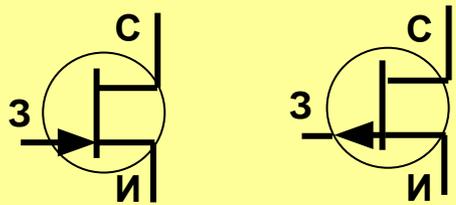
$$I_c = F(U_{си}) \text{ при } U_{зи} = \text{const}$$



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

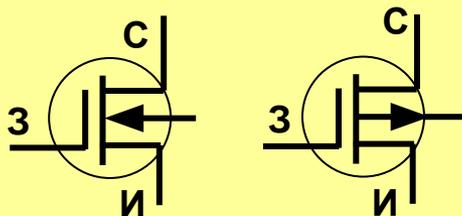


а)

б)

а - для канала n-типа

МДП со встроенным каналом

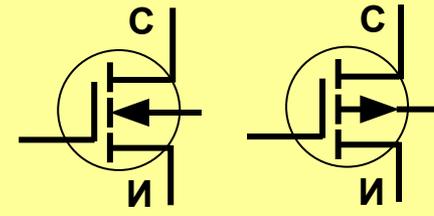


а)

б)

б - для канала р-типа

МДП с индуцированным каналом

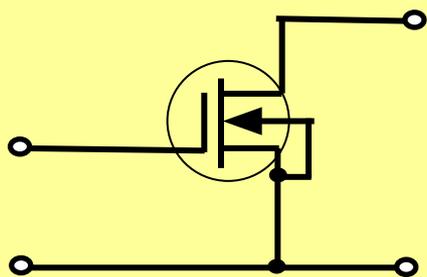


а)

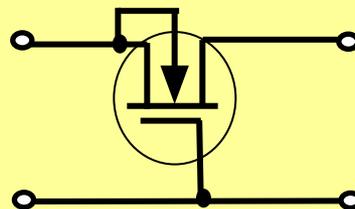
б)

Схемы включения

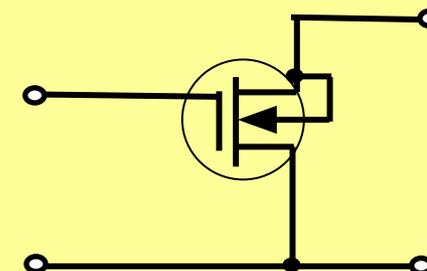
С общим истоком



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**.

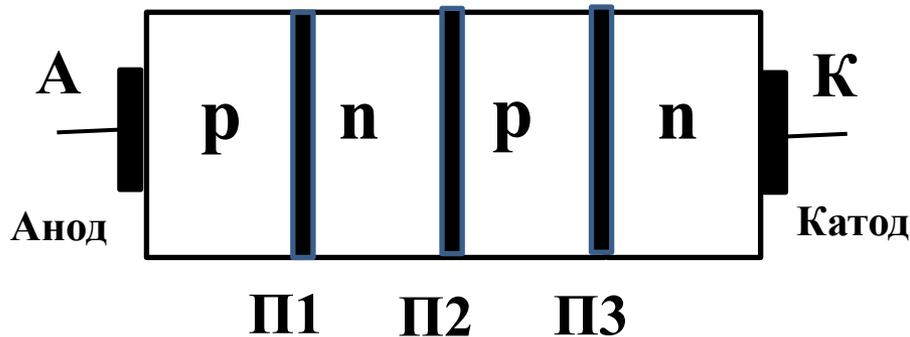
2. Имеют **большее** падение напряжения в **открытом** состоянии, чем БПТ, что увеличивает расход мощности.

ТИРИСТОРЫ

Тиристоры

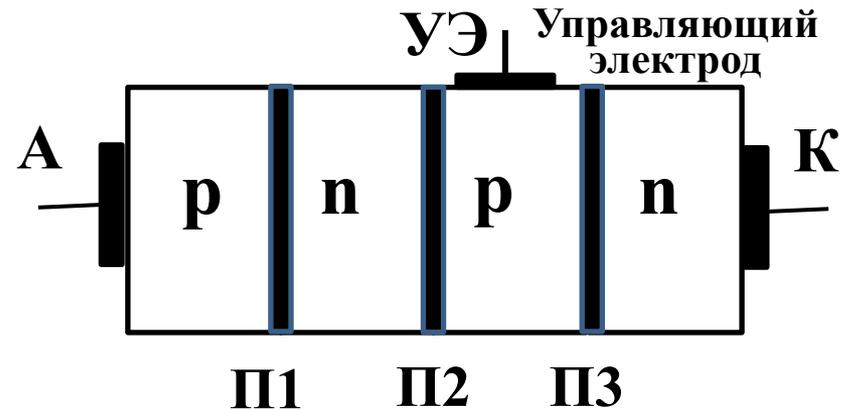
Тиристор – полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями и тремя или более последовательно включенными **p-n** переходами (П1, П2, П3).

Диодный тиристор



Принцип работы

Триодный тиристор



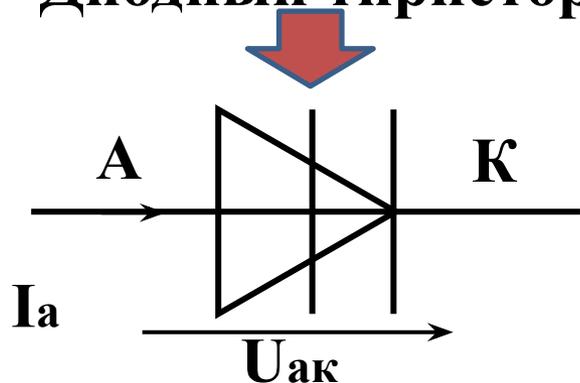
При плавном увеличении напряжения (U) на электродах (+ к **А**, - к **К** → П1 и П3 - открыты, П2 - закрыт) тиристор закрыт, ток мал.

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

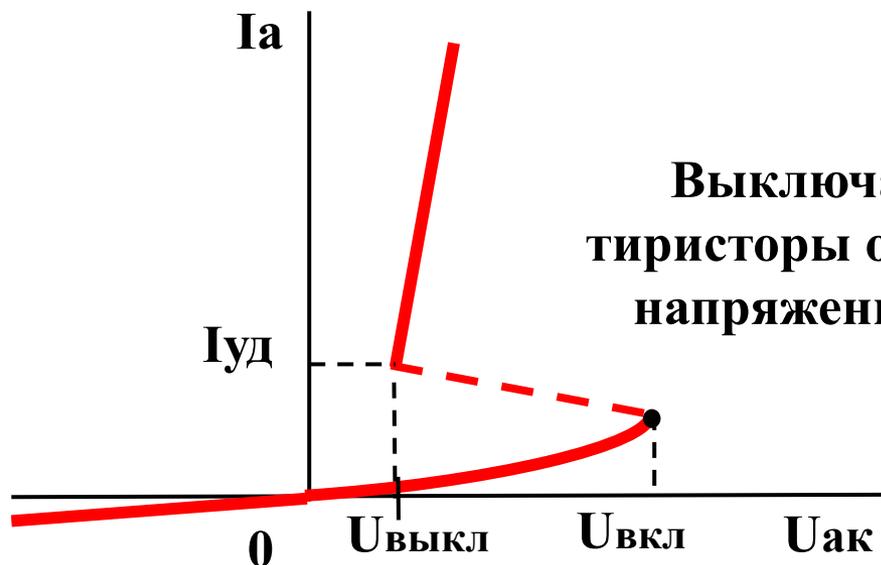
При уменьшении U процессы происходят в обратном порядке и при **$U_{выкл}$** тиристор выключается. Подавая напряжением на УЭ (+ $U_{упр}$) можно изменять **$U_{вкл}$** .

Условное обозначение, вольт-амперные характеристики и параметры тиристоров

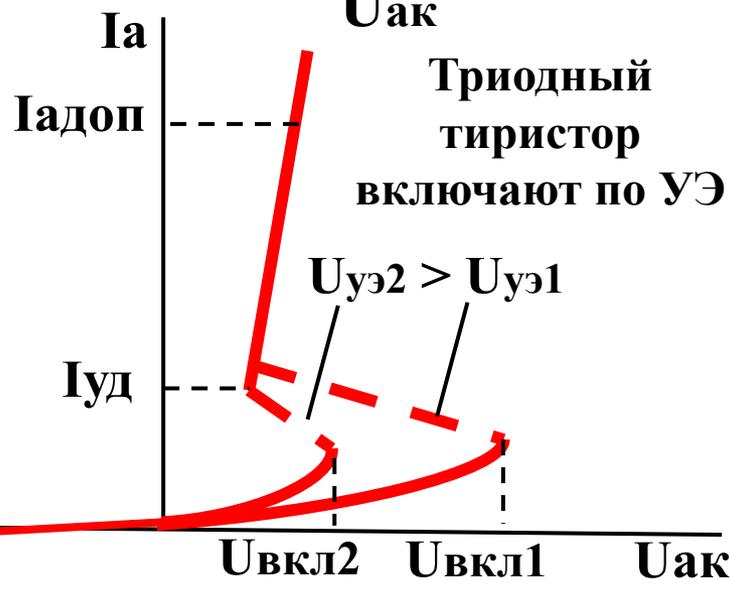
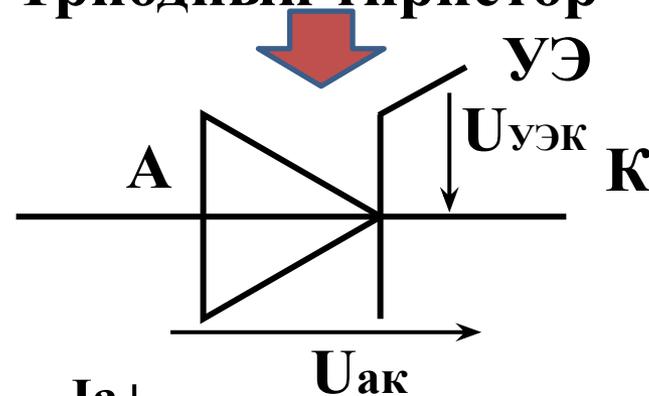
Диодный тиристор



$$I_a = F(U_a)$$



Триодный тиристор



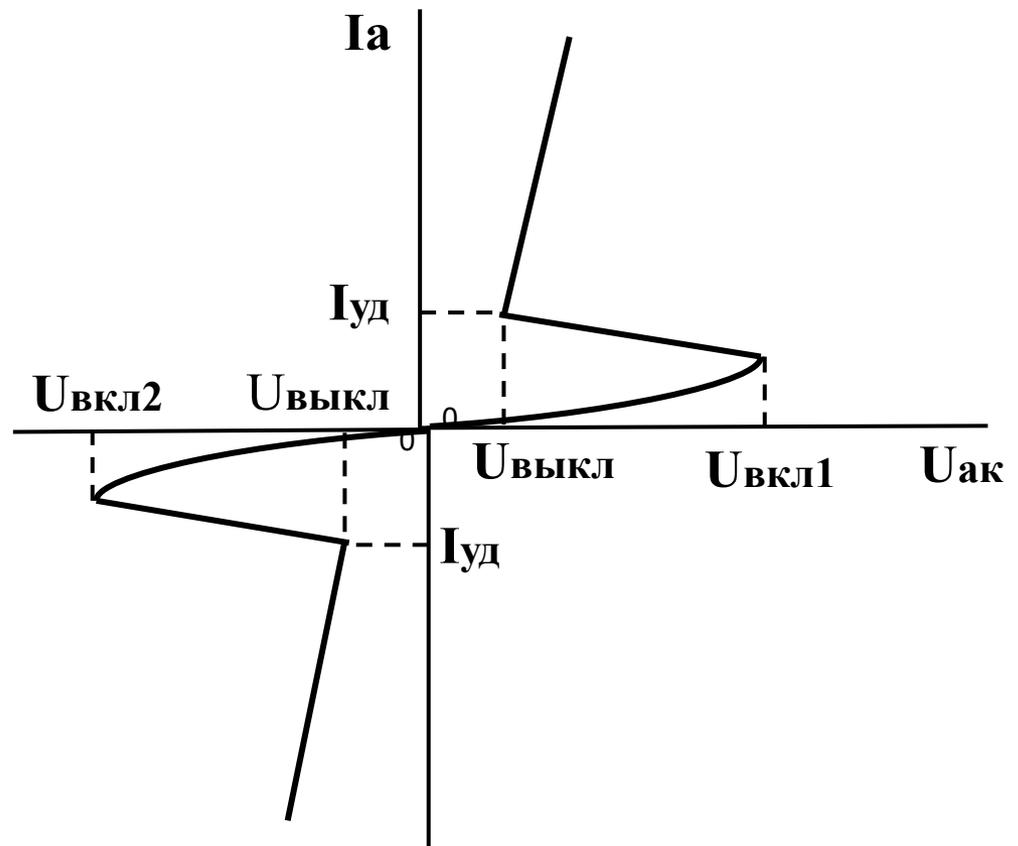
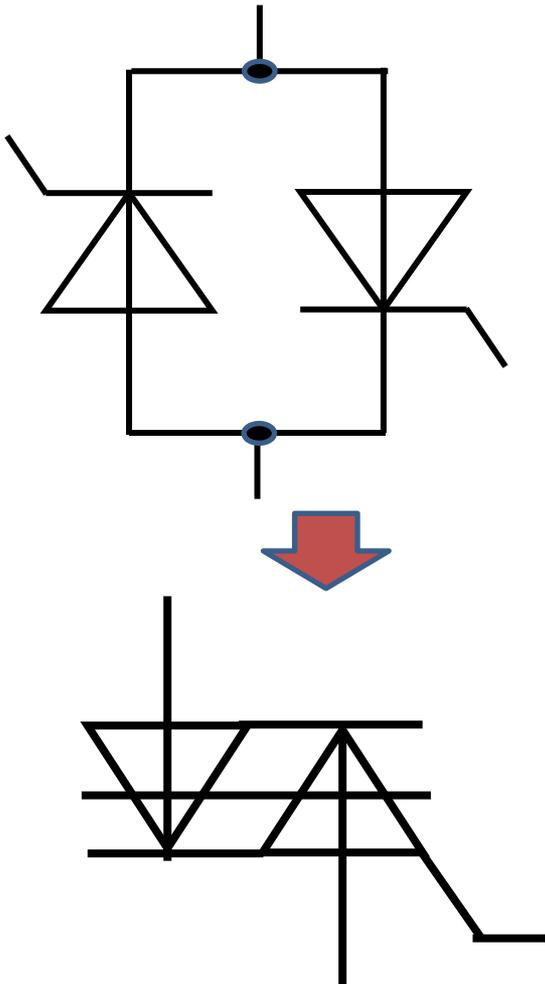
$U_{обрдоп}$ – наибольшее напряжение, которое может быть приложено в обратном направлении.

$I_{а.доп}$ – 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**)

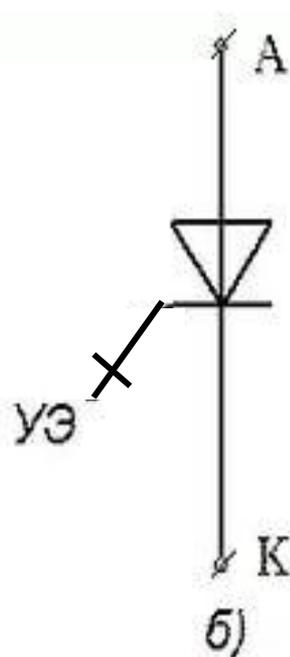
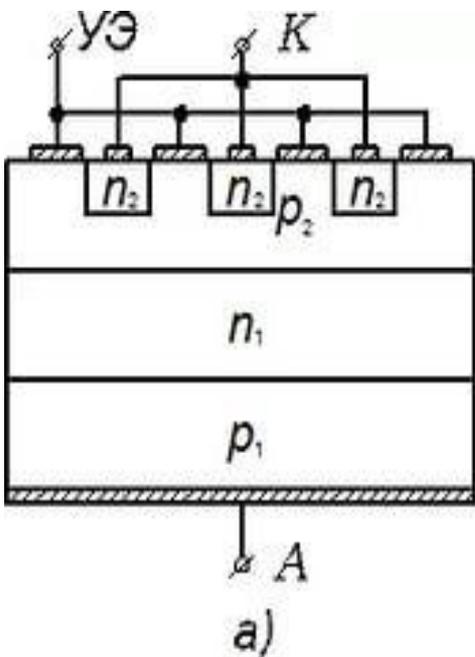


Запираемый тиристор

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 тиристорному он имеет катод К, анод А, управляющий электрод УЭ

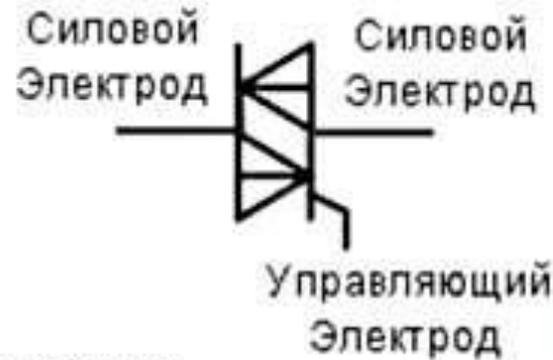


Катодный слой n разбит на несколько сотен элементарных ячеек, равномерно распределённых по площади и соединённых параллельно, что позволяет обеспечить равномерное снижение тока по всей площади полупроводниковой структуры при выключении прибора.

Внешний вид тиристоров



тиристоры



симисторы



динисторы

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

