

# Лекция 4

## БИПОЛЯРНЫЕ И ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

**Биполярные транзисторы.** Взаимодействие двух близкорасположенных электронно-дырочных переходов. Принцип работы биполярного транзистора. Виды биполярных транзисторов. Роль тока утечки между коллектором и базой.

**Режимы работы и схемы включения биполярных транзисторов.** Режимы работы. Основные схемы включения. Усиление тока и напряжения. Схема с общей базой. Схема с общим эмиттером. Схема с общим коллектором. Усилитель мощности.

**Транзисторный ключ.** Особенности ключевого режима работы транзистора. Параметры транзисторного ключа. Быстродействие ключевой схемы. Транзистор с барьером Шоттки.

**Планарные транзисторы.** Транзисторы, изготовленные по планарной технологии. Многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы.

**Полевые транзисторы.** Принцип работы полевых транзисторов. Виды полевых транзисторов. Металл-оксид-полупроводник МОП (МДП) структуры с изолированным затвором. МДП транзистор со встроенным каналом. МДП транзистор с индуцированным каналом. Быстродействие ключей на полевых транзисторах.

**Приборы и устройства транзисторного типа.** Флэш-память. Приборы с зарядовой связью.

**Транзистор** (от английского *transfer* – переносить и латинского *resistor* – сопротивление) – электронный прибор на основе полупроводникового кристалла, имеющий три электрода и предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний.

По физическому принципу работы транзисторы можно разделить на два основных класса: *биполярные* и *униполярные*.

В *биполярных* транзисторах физические процессы обусловлены переносом носителей заряда обоих знаков. В основе работы биполярных транзисторов лежат процессы *инжекции и диффузии неосновных носителей, дрейфа основных и неосновных носителей* заряда.

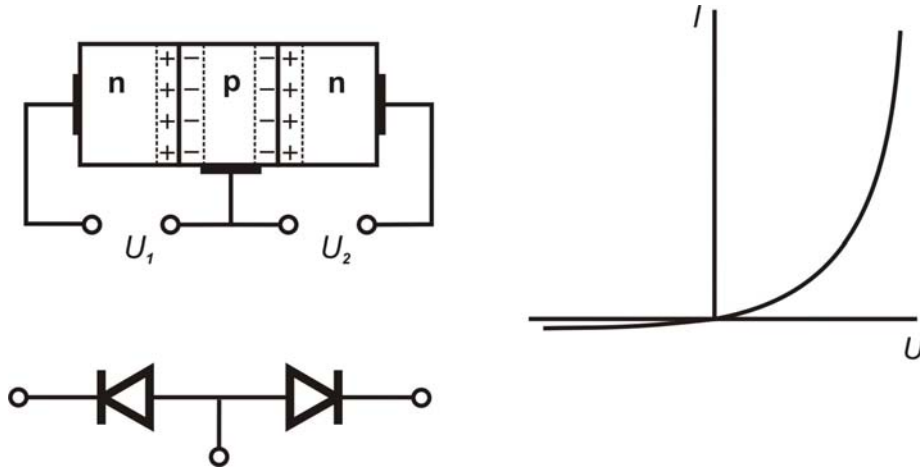
В *униполярных* транзисторах физические процессы протекания электрического тока в полупроводниках обусловлены носителями заряда одного знака – электронами или дырками. Перенос носителей заряда осуществляется за счет их дрейфа в электрическом поле.

Кроме двух основных классов, можно рассмотреть целый ряд устройств и структур транзисторного типа, действие которых основано на использовании различных физических явлений в полупроводниках и связанных, так или иначе, с управлением током при помощи тока.

## БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

### *Взаимодействие двух близкорасположенных электронно-дырочных переходов.*

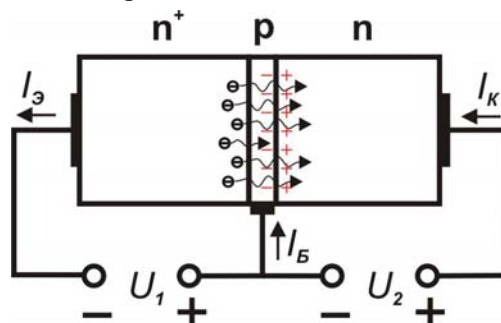
Рассмотрим трехслойную полупроводниковую структуру, в которой два слоя с одинаковым типом проводимости разделены слоем полупроводника с другим типом проводимости.



Получились два полупроводниковых диода, включенных навстречу друг другу. Если приложить внешнее поле, то один окажется включенным в прямом направлении, а другой – в обратном. Подавая определенный потенциал на средний слой, можно управлять токами через каждый из *p-n*-переходов, величина которых будет определяться видом ВАХ каждого из переходов.

Теперь представим, что средний слой довольно тонкий (толщина невелика по-сравнению с диффузионной длиной неосновных носителей). В этом случае эти два *p-n*-перехода не являются независимыми. Неосновные носители, инжектированные из левой части в средний слой, за счет диффузии быстро его проходят насквозь и попадают в правую часть, независимо от того, как включен правый *p-n*-переход.

Такая трехслойная полупроводниковая структура, состоящая из двух слоев полупроводника с одинаковым типом проводимости, разделенных тонким слоем полупроводника с другим типом проводимости, называется биполярным транзистором.

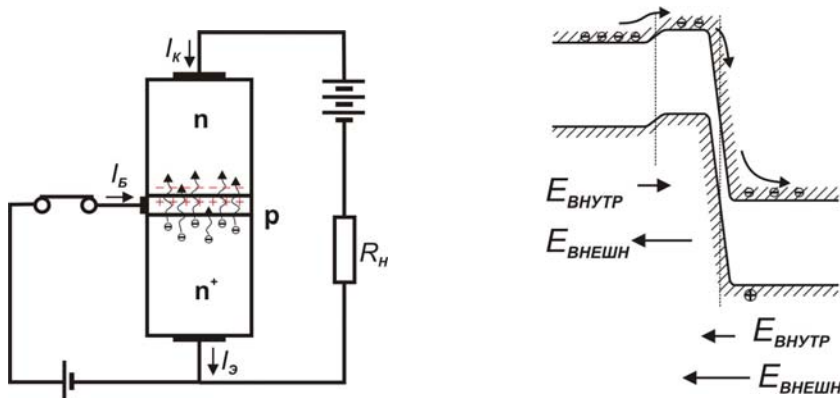


Обозначение  $n^+$  означает, что концентрация носителей повышена по-сравнению с  $n$ , то есть, область эмиттера сильно легированная. Напротив, слой базы имеет малую степень

легирования. Толщина слоя базы либо много меньше диффузионной длины неосновных носителей ( $I_B \ll L_{n,p}$ , случай тонкой базы), либо сравнима с ней ( $I_B \sim L_{n,p}$ , случай толстой базы). Благодаря этому два *p-n*-перехода эффективно взаимодействуют между собой.

Транзисторы *n-p-n* типа распространены существенно больше. Инжектируемыми носителями в этом случае являются электроны, подвижность которых в несколько выше, чем у дырок, что обуславливает большее быстродействие.

### Принцип работы биполярного транзистора



На рисунке показан *n-p-n*-транзистор, включенный по схеме «с общим эмиттером». В первом случае ключ *S* разомкнут, а во втором замкнут. Переход база-коллектор смещен в обратном направлении. Поэтому в первом случае имеющийся потенциальный барьер препятствует потоку основных носителей. Таким образом, пренебрегая током утечки (насыщения), можно считать, что при разомкнутом ключе *S* коллекторный ток равен нулю.

При замыкании ключа переход база-эмиттер становится смещенным в прямом направлении, а переход база-коллектор остается смещенным в обратном направлении. Благодаря смещению перехода база-эмиттер в прямом направлении электроны из эмиттера *n*-типа инжектируются в базу и диффундируют по направлению к обедненному слою на переходе база-коллектор. Эти электроны в слое базы являются неосновными носителями. Поэтому для них обедненный слой не является запирающим. Напротив, достигнув обедненного слоя, они ускоряются полем потенциального барьера и движутся в коллектор, создавая тем самым в коллекторе коллекторный ток.

Возникает вопрос, почему электроны не рекомбинируют с дырками при движении в базе *p*-типа в сторону коллектора. Причиной является то, что, во-первых, база является слабо легированной, а во-вторых, она является очень тонкой. Поэтому лишь очень малое число электронов будет перехвачено дырками и рекомбинирует.

$$I_K = \alpha I_Э, \text{ где } \alpha \sim 0.99 \dots 0.999$$

$\alpha$  - коэффициент передачи эмиттерного тока.

Малая доля электронов все же рекомбинирует, базовая область приобретает отрицательный связанный заряд. Батарея В1 в цепи базы является источником положительного заряда, который компенсирует убыль дырок в базе из-за рекомбинации. Протекание этого заряда и образует базовый ток транзистора  $I_B = I_E - I_K$ .

Благодаря базовому току в базе не происходит накопления отрицательного заряда и переход эмиттер-база поддерживается смещенным в прямом направлении, а это, в свою очередь, обеспечивает протекание коллекторного тока. Таким образом, в транзисторе имеет место управление током при помощи приложенного напряжения. Причем,  $I_B \ll I_K$

Отношение тока коллектора к току базы называется коэффициентом усиления тока базы  $\beta$ :

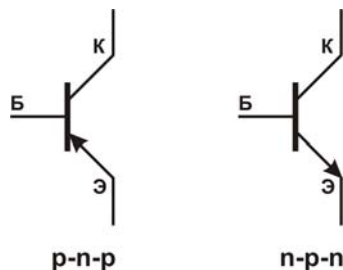
$$\beta = \frac{I_K}{I_E - I_K} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} - 1} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \sim 10^2 \dots 10^3$$

В типичном маломощном кремниевом транзисторе примерно 1 из 100 электронов рекомбинирует в базе, так что усиление тока имеет значение порядка 100.

Ранее упоминалось, что при смещении *p-n*-перехода в прямом направлении текущий по нему ток образуют как электроны, так и дырки. Но при рассмотрении смещенного в прямом направлении перехода база-эмиттер мы пока учитывали только электроны, пересекающие этот переход. Такой подход оправдан практически, поскольку область эмиттера специально легируется наиболее сильно (что обозначается  $n^+$ ), чтобы обеспечить число свободных электронов, в то время как область базы легируется совсем слабо, и это дает так мало дырок, что ими можно пренебречь при рассмотрении тока через переход база-эмиттер.

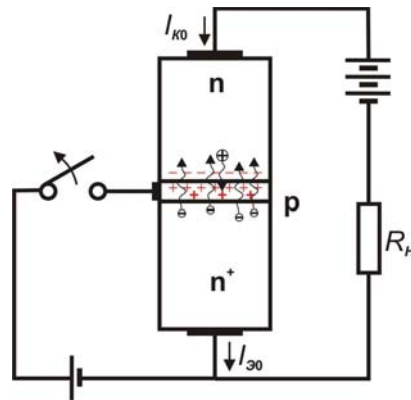
Ключевым моментом в работе транзистора является то, что, подавая на эмиттерный переход определенный, достаточно слабый, сигнал, мы добиваемся изменения тока в значительном диапазоне. Если в цепи коллектора поместить сопротивление нагрузки, на ней будет падать напряжение, определяющееся величиной протекающего тока и многократно превышающее исходный сигнал эмиттерном переходе. Таким образом реализуется возможность усиления напряжения.

### Виды биполярных транзисторов



На рисунке приведены условные обозначения *n-p-n* и *p-n-p*-транзисторов. Стрелочка всегда направлена от дырок к электронам и указывает направление протекающего тока.

### Роль тока утечки между коллектором и базой



Через смещенный в обратном направлении переход коллектор-база из коллектора в базу течет ток неосновных носителей дырок – ток утечки (ток насыщения). Величина этого тока  $I_{КБ0}$  для кремниевых транзисторов составляет порядка 0,01 мкА. Если транзистор включен в схему с общим эмиттером и цепь базы разомкнута, ток  $I_{КБ0}$  приводит к повышению потенциала базы и беспрепятственно течет в эмиттер, для которого этот ток неотличим от внешнего тока базы. Таким образом,  $I_{КБ0}$  усиливается транзистором, и ток утечки между коллектором и эмиттером возрастает до значения  $I_{КЭ} = \beta I_{КБ0}$ , что может составлять уже 1 мкА. Этот ток уже обусловлен током электронов из эмиттера, для которых повышение потенциала базы из-за притока дырок из коллектора привело к снятию потенциального барьера (даже в отсутствие отпирающего напряжения в цепи базы). Поскольку величина тока утечки из коллектора определяется током неосновных носителей – дырок, концентрация которых сильно зависит от температуры:

$$p_n n_n = n_i^2 \approx p_n N_D \Rightarrow p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{N_C^2}{N_D} e^{-\frac{E_g}{k_B T}},$$

то и ток  $I_{КБ0}$  сильно зависит от температуры, увеличиваясь примерно вдвое при нагревании на каждые 18<sup>0</sup>С. Когда  $I_{КЭ0}$  становится сравнимым с нормальным током коллекторной цепи, транзистор обычно считается слишком горячим. Кремниевые *p-n*-переходы могут работать до 200<sup>0</sup>С, а германиевые, имеющие много больший (в 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> раз) ток утечки, только до 85<sup>0</sup>С

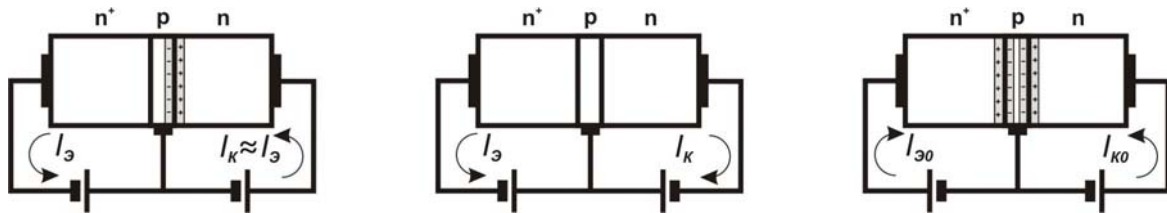
Когда кремниевый транзистор работает при комнатной температуре, токами  $I_{КБ0}$  и  $I_{КЭ0}$  можно практически полностью пренебречь. В германиевом транзисторе при комнатной температуре (20<sup>0</sup>С) ток  $I_{КБ0}$  имеет значение порядка 2 мкА, так что при  $\beta=100$  ток  $I_{КЭ0}$  будет равен 200 мкА. Наличие относительно большого тока утечки является той причиной, по которой германиевые транзисторы почти не используются, за исключением специальных целей, когда требуется малая разность потенциалов на германиевом *p-n*-переходе, смещенном в прямом направлении.

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ И СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БП ТРАНЗИСТОРОВ.

### Режимы работы

Каждый из р-п переходов может быть включен как в прямом, так и в обратном направлении. В связи с этим различают три режима работы.

Активный режим - один **р-п**-переход включен в прямом, а другой – в обратном направлении.



В рассмотренных выше случаях транзистор работает в активном режиме. Если в цепь эмиттера подать входной сигнал, а в цепь коллектора включить сопротивление нагрузки, то транзистор будет работать как усилитель сигналов.

Режим насыщения – оба перехода включены в прямом направлении. Происходит встречная инжекция в базу неосновных (по отношению к базе) носителей из эмиттера и коллектора. Сопротивление транзистора уменьшается, течет большой ток.

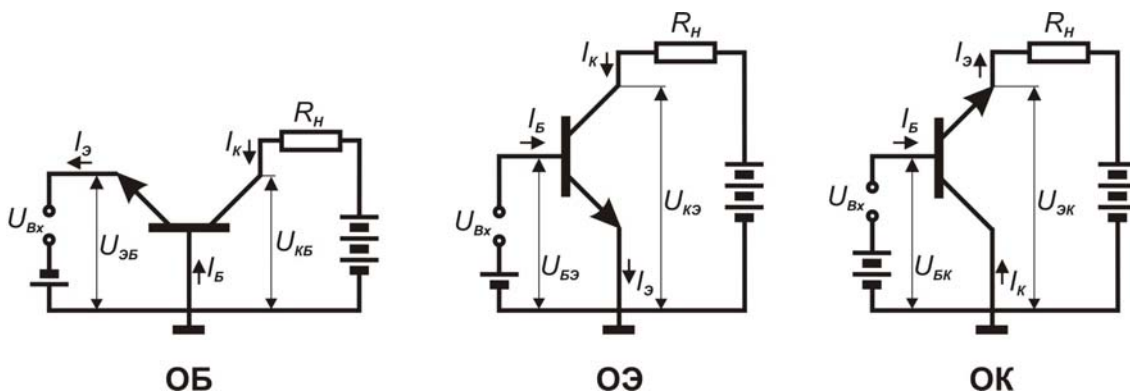
Режим отсечки - оба перехода подключены в обратном направлении. Происходит обеднение приконтактных областей неосновными носителями (экстракция). Сопротивление базовой области становится большим, что соответствует закрытому состоянию транзистора.

Напомним, что процессы инжекции и экстракции неосновных носителей в области **р-п**-перехода описываются выражениями:

$$n_p = n_{p0} e^{\frac{eU}{k_B T}}, \text{ или } p_n = p_{n0} e^{\frac{eU}{k_B T}}$$

### Основные схемы включения

Различают три возможные схемы включения: с общей базой, общим эмиттером, общим коллектором. На рисунке они показаны для активного режима работы.



**Усиление тока и напряжения в схемах на биполярных транзисторах.**

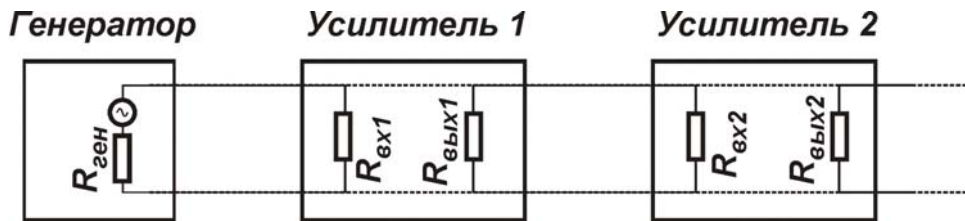
При сопоставлении схем с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором будем анализировать их усилительные свойства:

коэффициент усиления по току:  $K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}$ ,

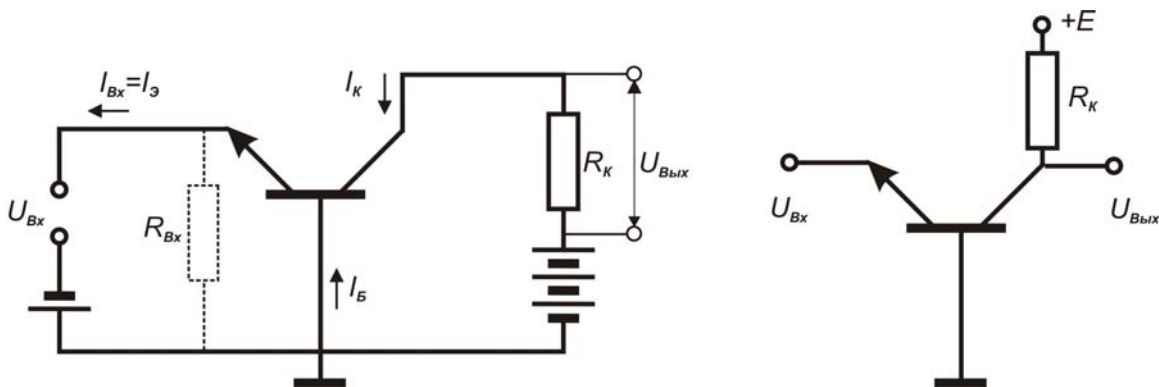
коэффициент усиления по напряжению:  $K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$ ,

а также величину так называемого входного усиления. Каждая электронная схема характеризуется входным сопротивлением  $R_{вх}$ . Это очень существенная характеристика, поскольку при соединении электронных каскадов необходимо согласовать выходное сопротивление генератора (или предыдущего каскада) с входным сопротивлением следующего каскада. Выходной ток предыдущего каскада служит входным током следующего и падение напряжения должно перераспределиться таким образом, чтобы основная мощность выделялась на входе последующего каскада. Для этого необходимо, чтобы выполнялись следующие условия (см. рис):

$R_{вых.ген} \ll R_{вх1}$ ,  $R_{вых.1} \ll R_{вх2}$  и т.д.



**Схема с общей базой.**



В этом случае для токов:

$I_{Вх} = I_Э$        $I_{Вых} = I_К$

$$I_{Bx} \approx I_{Bвых}$$

$$K_I = \frac{I_{Bвых}}{I_{Bx}} \approx 1, \quad \text{то есть, отсутствует усиление по току.}$$

Для напряжений:

$$K_U = \frac{U_{Bвых}}{U_{Bx}} = \frac{I_K R_K + I_B r_B}{I_{\mathcal{E}}(r_{\mathcal{E}} + r_{BЭдиф}) + I_B r_B} \approx \frac{R_K}{r_{\mathcal{E}} + r_{BЭдиф}}$$

То есть, усиление по напряжению может быть достаточно большим.

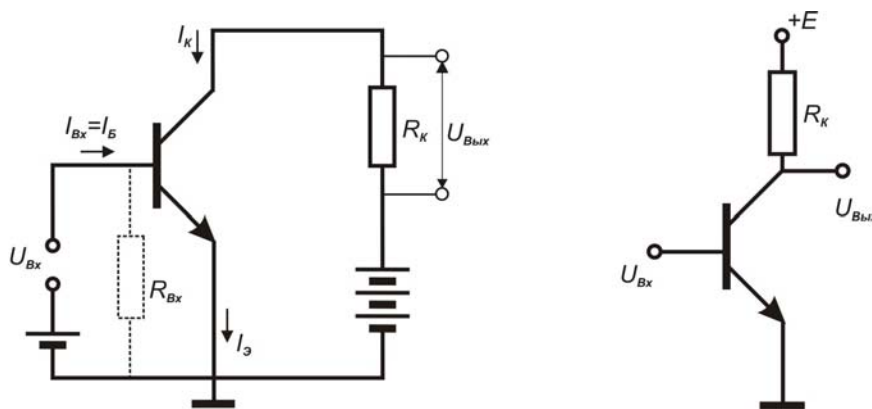
По определению

$$R_{Bx} = \frac{U_{Bx}}{I_{Bx}} = \frac{I_{\mathcal{E}}(r_{\mathcal{E}} + r_{BЭдиф}) + I_B r_B}{I_{\mathcal{E}}} \approx r_{\mathcal{E}} + r_{BЭдиф},$$

Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода (составляет в зависимости от режима включения от десятков Ом до десятков кОм, при номальном режиме работы это будут десятки Ом, т.е. это очень маленькое сопротивление). Сопротивление  $\mathcal{E}$  близко к 0 потому, что концентрация носителей высокая.

Схема с общей Б не дает усиления по току и имеет малое входное сопротивление.

### Схема с общим эмитером



$$K_I = \frac{I_{Bвых}}{I_{Bx}} = \frac{I_{\mathcal{E}}}{I_B} = \beta. \quad \text{Напомним, что } \beta \sim 10^2 \dots 10^3$$

$$K_U = \frac{U_{Bвых}}{U_{Bx}} = \frac{I_K R_K + U_{KЭ}}{I_B r_B + I_{\mathcal{E}}(r_{\mathcal{E}} + r_{BЭдиф})} \approx \frac{R_K}{r_{BЭдиф}}$$

Если в цепи эмиттера поставить дополнительный резистор  $R_{\mathcal{E}} \gg r_{\mathcal{E}}, r_{BЭдиф}$ , то получим



$$K_U \approx \frac{R_K}{R_3},$$

то есть, имеем возможность в определенной степени определять требуемую величину усиления по напряжению.

Для входного сопротивления получим:

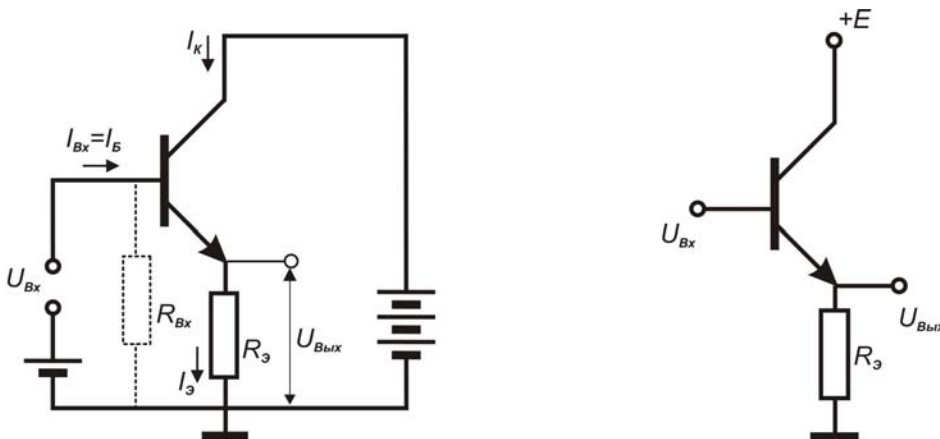
$$R_{Bx} = \frac{U_{Bx}}{I_{Bx}} = \frac{I_B r_B + I_3 (r_3 + r_{BЭдиф})}{I_B} \approx \beta (r_3 + r_{BЭдиф}),$$

или, при наличии  $R_3$ ,

$$R_{Bx} \approx \beta R_3$$

Таким образом, схема с ОЭ обеспечивает возможность усиления и по току, и по напряжению, то есть, она может использоваться для усиления мощности. К тому же, эта схема характеризуется достаточно высоким входным сопротивлением.

### Схема с общим коллектором



В данном случае входной сигнал подается на базу транзистора, а выходная нагрузка находится в цепи эмиттера.

$$I_{Bx} = I_B, \quad I_{Vых} = I_3,$$

$$K_I = \frac{(\beta - 1)I_B}{I_B} \approx \beta$$

Напряжение на открытом *p-n*-переходе Б – Э очень маленькое. Поэтому

$$U_{Bx} = U_{БЭ} + U_{Vых} \approx U_{Vых},$$

То есть, усиления по напряжению в схеме с ОК нет.

Такое включение называется *эмиттерным повторителем*.

Найдем входное сопротивление:

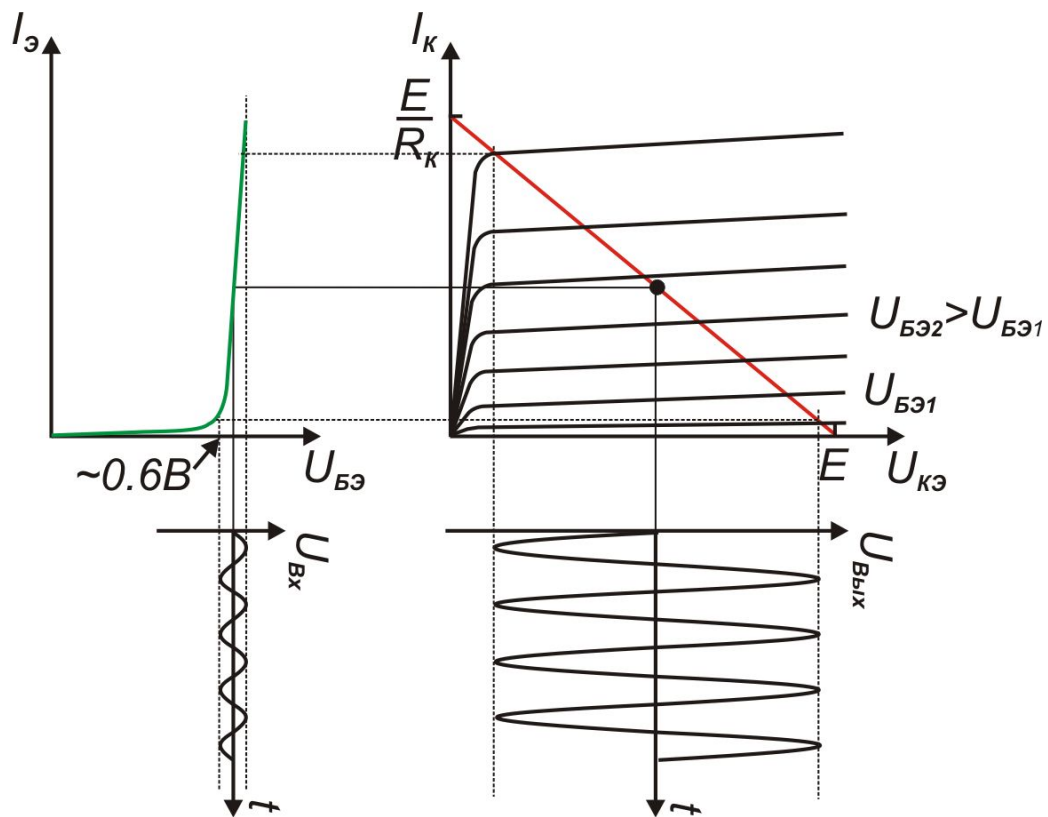
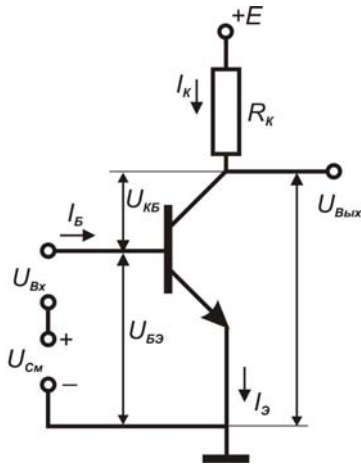
$$R_{Bx} = \frac{U_{Bx}}{I_{Bx}} \approx \frac{I_B R_B + I_B (\beta + 1) R_{БЭдиф} + I_B (\beta + 1) R_H}{I_B} \approx \beta R_3,$$

с учетом того, что сопротивление нагрузки  $R_3$  может быть довольно большим.

Схема с общим К характеризуется отсутствием усиления по напряжению и очень большим входным сопротивлением. По этой причине ее очень часто используют для согласования каскадов между собой. Если у какого-то каскада маленькое входное сопротивление перед ним ставится эмиттерный повторитель. Он не меняет напряжение, а входное сопротивление увеличивает значительно.

**Усилитель мощности (графический анализ работы).**

Вернемся к схеме с общим эмиттером.



Для выходного напряжения можно написать:

$$U_{\text{Вых}} = E - R_K I_K.$$

где  $E$  – напряжение источника питания. Это уравнение так называемой нагрузочной прямой для данных параметров схемы, которая налагает ограничения на выбор выходных значений тока и напряжения из всех возможных значений.

Нужно выбрать условия так, чтобы рабочая точка (то есть величина сигнала на выходе при нулевом уровне входного сигнала) приходилась примерно на середину рабочей нагрузочной прямой. Когда на вход ничего не подается, должно быть:

$$U_{\text{Вых}} = E - R_K I_{K0} = \frac{E}{2}$$

Здесь  $I_{K0}$  - величина коллекторного тока при отсутствии сигнала на входе схемы. То есть, переход  $\mathcal{Э}-\mathcal{Б}$  при этом должен быть открыт путем подачи на переход  $\mathcal{Э}-\mathcal{Б}$  начального смещения определенного уровня, а ток через переход будет иметь величину, определяемую напряжением источника питания и сопротивлением нагрузки  $R_K$  в цепи коллектора. Чтобы правильно выбрать рабочую точку, нужно подобрать правильное соотношение напряжения питания и сопротивления нагрузки:

$$R_K = \frac{1}{2} \frac{E}{I_{K0}}$$

$I_{K0}$  – средний коллекторный ток, оптимальный для данного транзистора (можно найти в справочнике) и обеспечивающий требуемые характеристики схемы. Для обычных маломощных транзисторов это порядка **0,1 мА**. Если течет такой ток, то сопротивление перехода  $\mathcal{Э}-\mathcal{Б}$  довольно мало.

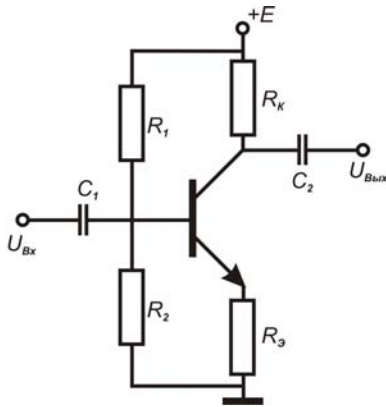
Если мы добились того, что рабочая точка попадает в середину нагрузочной прямой, мы подаем на вход схемы определенное напряжение сравнительно небольшой амплитуды. Этому входному сигналу соответствует на характеристике конкретный диапазон токов. Входной сигнал небольшой амплитуды соответствует большой амплитуде изменения тока. Большая амплитуда изменения тока соответствует довольно большому диапазону изменения напряжения на выходе. Т.е. с помощью маленького сигнала мы управляем большим сигналом.

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{Вых}}}{U_{\text{Вх}}} \approx \frac{I_K R_K}{I_B r_B + I_{\mathcal{Э}} (r_{\mathcal{Э}} + r_{\mathcal{ЭБдиф}} + R_{\mathcal{Э}})} \approx \frac{R_K}{r_{\mathcal{ЭБдиф}} + R_{\mathcal{Э}}}$$

Например:  $E = 5$  В,  $I_{K0}$  порядка 1 мА. Получается  $R_K$  примерно 2,5 кОм,  $r_{\mathcal{ЭБдиф}}$  – 25 Ом. Такая схема будет усиливать по напряжению в тысячу раз.

Реальная схема должна быть несколько сложнее этой упрощенной схемы.



В цепь эмиттера ставится сопротивление обратной связи  $R_3$

$$K_U \approx \frac{R_K}{R_3}$$

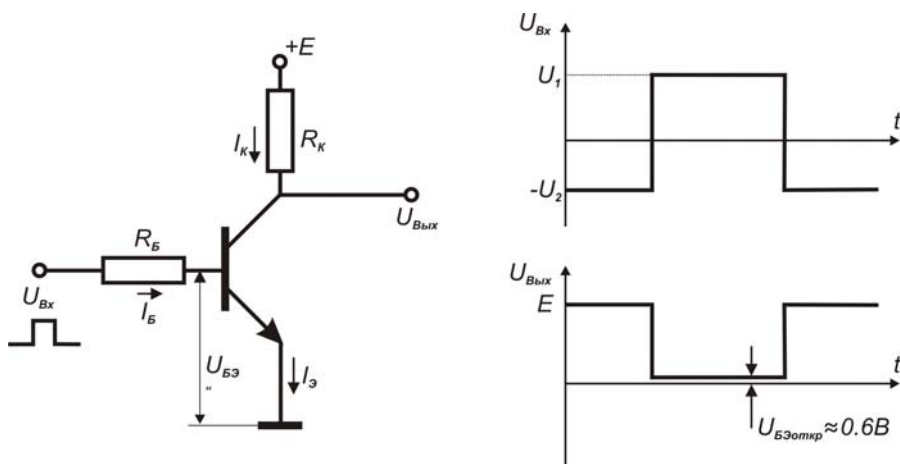
Допустим в  $K$  стоит 2,5кОм, а в  $\mathcal{E}$  250 Ом. Коэффициент усиления будет равен 10. Он будет меньше, но зато он будет определяться только номиналами этих сопротивлений, которые можно задавать достаточно точно.

## ТРАНЗИСТОРНЫЙ КЛЮЧ

### *Особенности ключевого режима работы транзистора*

Транзисторный ключ – устройство на транзисторе, обеспечивающее переключение тока в нагрузке при подаче на базу транзистора напряжения определенной полярности и уровня. Транзисторный ключ позволяет преобразовать входной сигнал в последовательность импульсов с достаточно крутыми фронтами. Транзистор в ключевой схеме попеременно находится в *режиме отсечки* и в *режиме насыщения*.

Простейший транзисторный ключ:



При подаче на вход прямоугольного сигнала на выходе тоже получаем прямоугольный сигнал.

### Параметры транзисторного ключа

Основное требование:  $U_{Вых} \geq U_H$ , если  $U_{Вх} \leq U_L$   
 $U_{Вых} \leq U_L$ , если  $U_{Вх} \geq U_H$

Пусть у нас Si-транзистор:  $\beta = 100$ ,  $U_{БЭнас} = 0.6В$ . Коллекторный ток в открытом состоянии  $I_{Кнас}$  не должен быть слишком большим, чтобы не ухудшать быстродействие, например,  $10^{-3}А$ .

Надо выбрать разумные значения  $U_H$  и  $U_L$ , а также значения  $R_K$  и  $R_B$ .

! Выбор  $U_L$ : кремниевый транзистор полностью открывается при  $U_{БЭ} = 0.6В$  и остается надежно запертым при  $U_{БЭ} = 0.4В$ . Из этих соображений выбираем  $U_L = 0.4В$

! Выбор  $U_H$ : Минимальное разумное значение сопротивления внешней нагрузки  $R_H = R_K$ . В этом случае на выходе закрытого ключа  $U = \frac{ER_H}{R_H + R_K} = \frac{E}{2}$ , что должно восприниматься последующей схемой как 1. Для уверенности зададим  $U_H \geq 1.5В$ .

Область **0.4...1.5В** – область неопределенных значений.

! Выбор  $R_K$ : в открытом состоянии  $R_K \approx \frac{E}{I_{Кнас}} = \frac{5В}{10^{-3}А} = 5кОм$

! Выбор  $R_B$ : сопротивление в базе ограничивает максимальный ток. Оно должно быть выбрано так, чтобы транзистор надежно открывался при поступлении на вход сигнала с минимально допустимой для высокого уровня величины. Ток базы должен быть  $I_B = I_{Кнас} / \beta = 10мкА$ . Для надежности потребуем, чтобы  $R_B$  был еще меньше, так чтобы  $I_B = 100мкА$ . Для этого необходимо

$$R_B \approx \frac{U_H - U_{БЭнас}}{I_{Бмин}} = \frac{1.5В - 0.6В}{10^{-4}А} \approx 9кОм$$

### Быстродействие ключевой схемы

Транзистор находится либо в закрытом состоянии (отсечка), либо в открытом (насыщение). Качество работы электронного ключа определяется скоростью работы, то есть временем перехода из одного состояния в другое.

До  $t_0$  - транзистор в режиме отсечки;

$t_0...t_1$  - время задержки включения (пока электроны долетят до коллектора, разряд барьерной емкости);

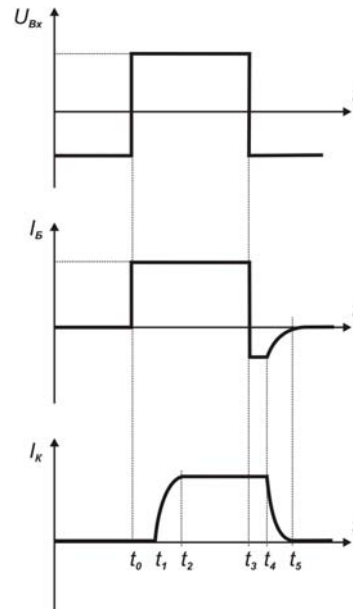
$t_1$  - отпирание;

$t_2$  - переход в режим насыщения, заряд диффузионной емкости;

$t_3$  - конец входного импульса;

$t_4$  - время рассасывания заряда (разряд диффузионной емкости)

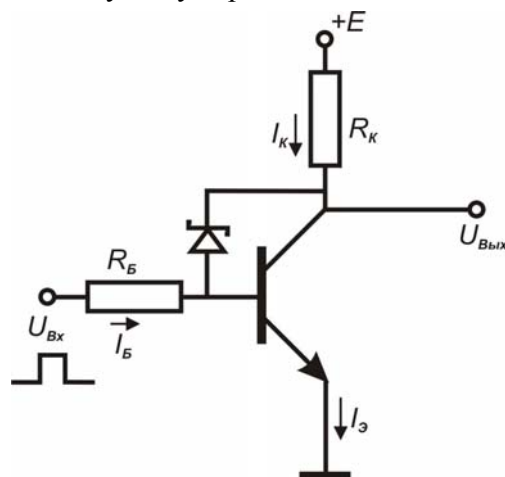
$t_4...t_5$  - время спада



Чем больше насыщение транзистора, тем меньше его быстродействие. Насыщенные ключи применяются в устройствах автоматики, где быстродействие не требуется.

### Транзистор с барьером Шоттки

Для повышения быстродействия используются ненасыщенные ключи на основе транзисторов с диодом Шоттки (транзистор Шоттки), у которых коллекторный переход зашунтирован быстродействующим ДШ (время восстановления 0.1нс и менее, напряжение отпирания около 0.25В). Применяются также устройства на эмиттерно-связанной логике (ЭСЛ), у которых также отсутствует режим насыщения.



## ПЛАНАРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

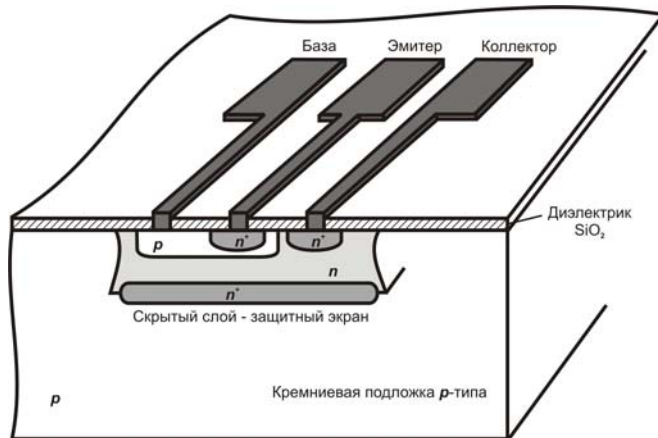
### *Транзисторы, изготовленные по планарной технологии*

Обычно кремниевая подложка;

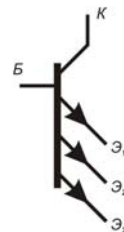
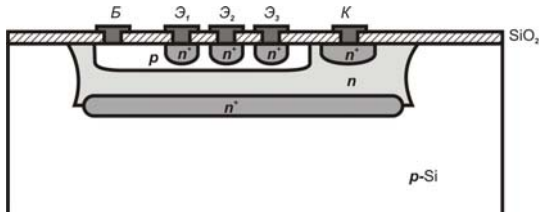
Защитная диэлектрическая пленка  $\text{SiO}_2$ ;

*n-p-n* – вследствие большей подвижности электронов;

*Si* – допускает большую температуру, до  $150^\circ\text{C}$ , меньше обратные токи.



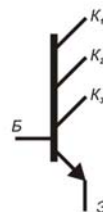
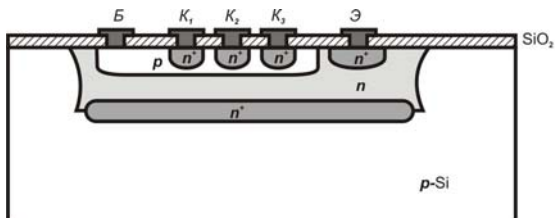
### *Многоэмиттерные транзисторы.*



Позволяет повысить степень миниатюризации.

Если хотя бы к одному эмиттеру приложить низкий потенциал, транзистор откроется.

### *Многоколлекторные транзисторы.*



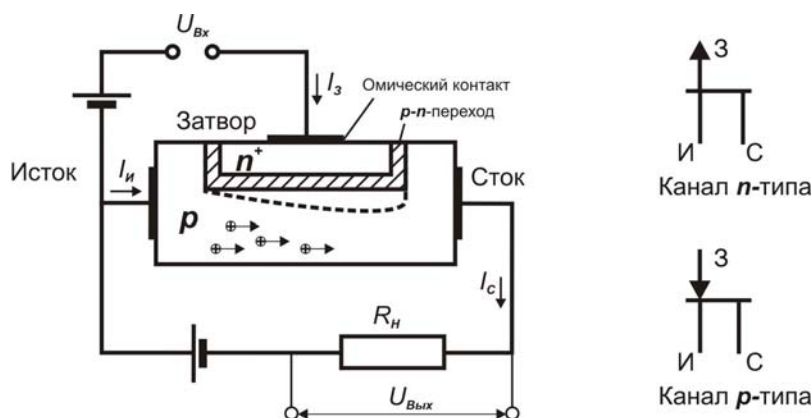
## ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

### Принцип работы полевых транзисторов

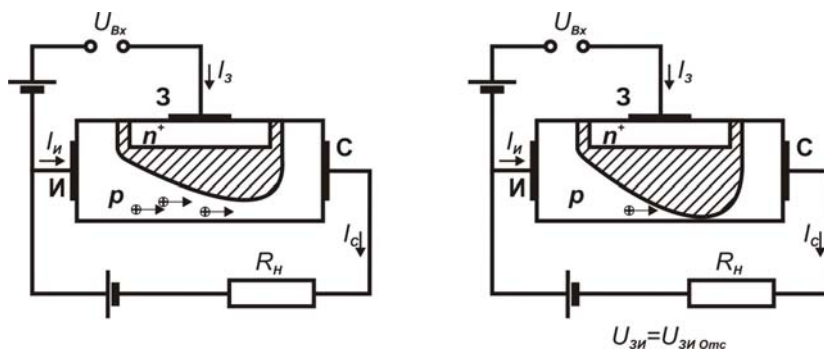
FET – Field effect transistor

Униполярные транзисторы (в отличие от биполярных).

Полевой транзистор с управляющим переходом и каналом *p* типа



Полевые транзисторы были предложены где-то в 30-е г.г. Были реализованы позже б/п.



Между затвором, истоком и стоком может подаваться определенное напряжение. Подаем напряжение  $U_{зи}$  на затвор так, что  $n^+ - p$  переход включен в обратном направлении. Ширина запирающего слоя начинает меняться. Соответственно меняется ширина канала. Ширина объединенного слоя увеличивается, а ширина канала, который может проводить ток, уменьшается. Соответственно изменяется проводимость. Таким образом, с помощью маленького сигнала меняем проводимость транзистора. Если подать слишком большое напряжение  $U_{зи Отс}$ , ширина запирающего слоя может перекрыть весь канал, и транзистор перейдет в режим отсечки.

За счет падения напряжения в подложке  $p - n$  переход шире в тех областях, которые ближе к стоку.

Все основные закономерности похоже на те, что имеют место в случае биполярных транзисторов, но принцип работы другой.

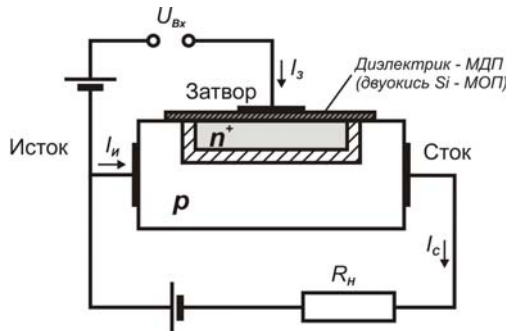


Есть обедненный слой. Поэтому такой транзистор будет характеризоваться барьерной емкостью, так же как б/п транзистор. Диффузионной емкости тут не будет, поскольку нет инжекции.

Для полевого транзистора также могут быть выделены схемы включения с общим истоком (эквивалентно схеме с общим Э), с общим затвором (эквивалентно схеме с общей Б), с общим стоком (эквивалентно схеме с общим К).

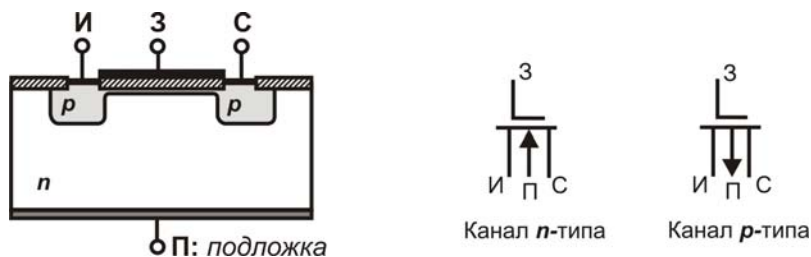
### Виды полевых транзисторов.

#### Металл-оксид-полупроводник МОП (МДП) структуры с изолированным затвором



Принцип его работы примерно такой же. Отличие: благодаря диэлектрику входное сопротивление очень большое. Это очень ценное свойство. Но надо предпринимать дополнительные меры для защиты от статического электричества.

#### МДП транзистор со встроенным каналом



Уже до подачи напряжения на затвор имеется канал  $p$ -типа, соединяющий исток и сток.

**Режим обеднения.** Если  $U_{зи} > 0$ , то канал обедняется.

**Режим отсечки.** При некотором напряжении отсечки  $U_{зи} > U_{зиотс}$  практически все дырки из канала уходят в подложку. Ток между истоком и стоком равен 0.

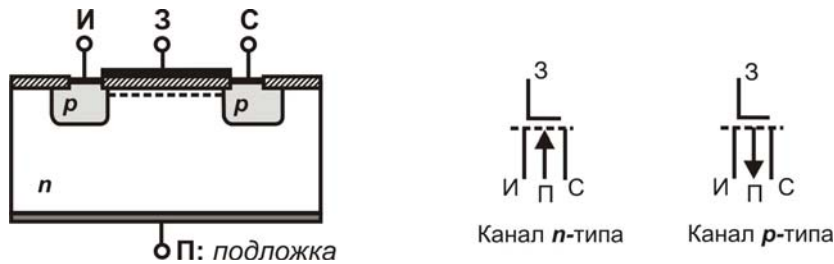
**Режим обогащения.** Если  $U_{зи} > 0$ , проводимость канала растет за счет увеличения концентрации дырок.

Обозначение на схеме транзистора со встроенным каналом.

Подложка образует с истоком, стоком и каналом  $p$ - $n$ -переход. Надо следить, чтобы он не смещался в прямом направлении.

Обычно подложка соединяется с истоком.

### МДП транзистор с индуцированным каналом



При подаче отрицательного напряжения  $U_{зи}$  на затвор индуцируется канал при превышении  $U_{зи} > U_{зи\text{порог}}$ . При этом концентрация дырок под затвором увеличивается, то есть, изменяется тип проводимости (инверсия).

### Быстродействие ключей на полевых транзисторах

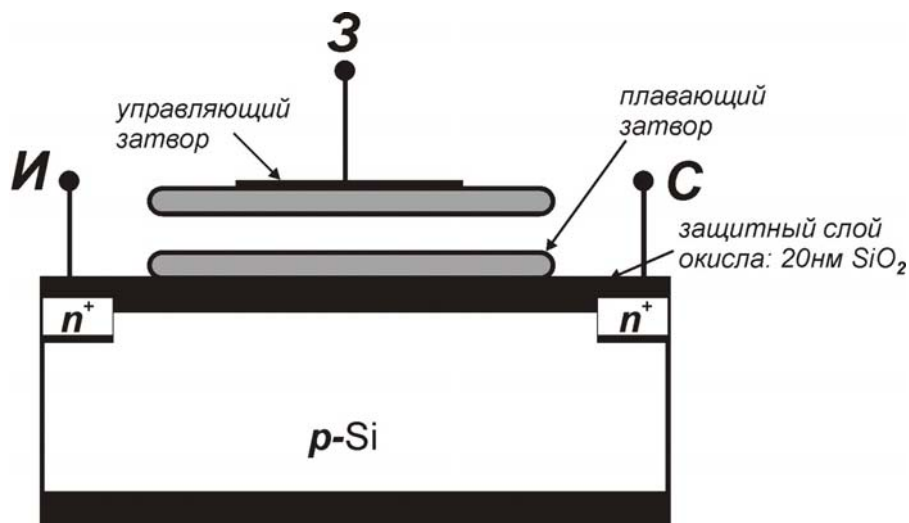
Быстродействие в большинстве случаев уступает ключам на биполярных транзисторах. Однако, они дают большой выигрыш по току из-за большого входного сопротивления. Быстродействие ключей на КМОП-транзисторах на порядок выше.

## ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА ТРАНЗИСТОРНОГО ТИПА

### Флэш-память

Нужно устройство, в котором информация может храниться достаточно долго.

При подаче на управляющий затвор положительного напряжения происходит туннелирование электронов из сильно легированной области через слой оксида кремния на плавающий затвор, происходит запись. Для считывания подаем на затвор положительное напряжение (оно меньше, чем требуется для записи) и одновременно проверяем напряжение между истоком и затвором. Если есть напряжение, значит нет ничего, если нет - значит есть запись. Для стирания информации подаем отрицательный импульс на затвор.



### ***Приборы с зарядовой связью***

В данном случае прибор с зарядовой связью – двухмерная (может быть одномерная) матрица. Например, в цифровых фотокамерах для получения изображения.

Затворы через два на третий между собой объединены в линии. В результате приложения к затвору напряжения создается потенциальная яма. В ней скапливаются электроны. За счет конфигурации поля они остаются локализованными в яме.

Как считать электроны?

Пусть начальное распределение напряжения на затворах создано таким образом, что производится накопление электронов в ячейках, пропорциональное освещенности.

В момент времени  $t_2$  меняем конфигурацию поля. На второй затвор подаем напряжение еще более сильное, чем на первом затворе. За счет того, что эти потенциальные ямы находятся очень близко, заряд переходит на одну позицию. В момент времени  $t_3$  мы считали заряд. И т.д. Таким образом, мы двигаем заряд и считываем его последовательно. За определенное число циклов мы считаем всю информацию. Заряд в потенциальной яме образуется при освещении светом или каким-то электрическим путем.