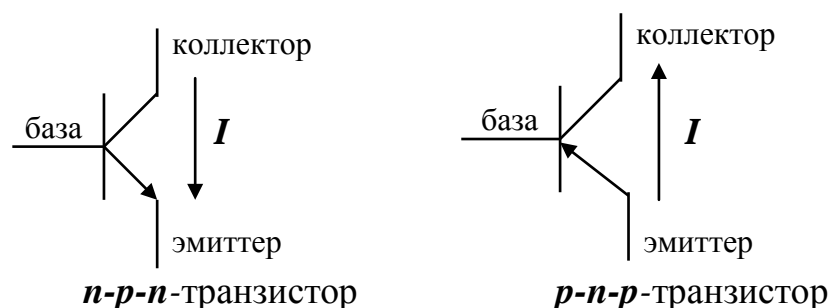


Лекция №3

Транзисторы. Общие вопросы. Физические процессы

§1. Биполярный транзистор.

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими переходами и тремя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда.

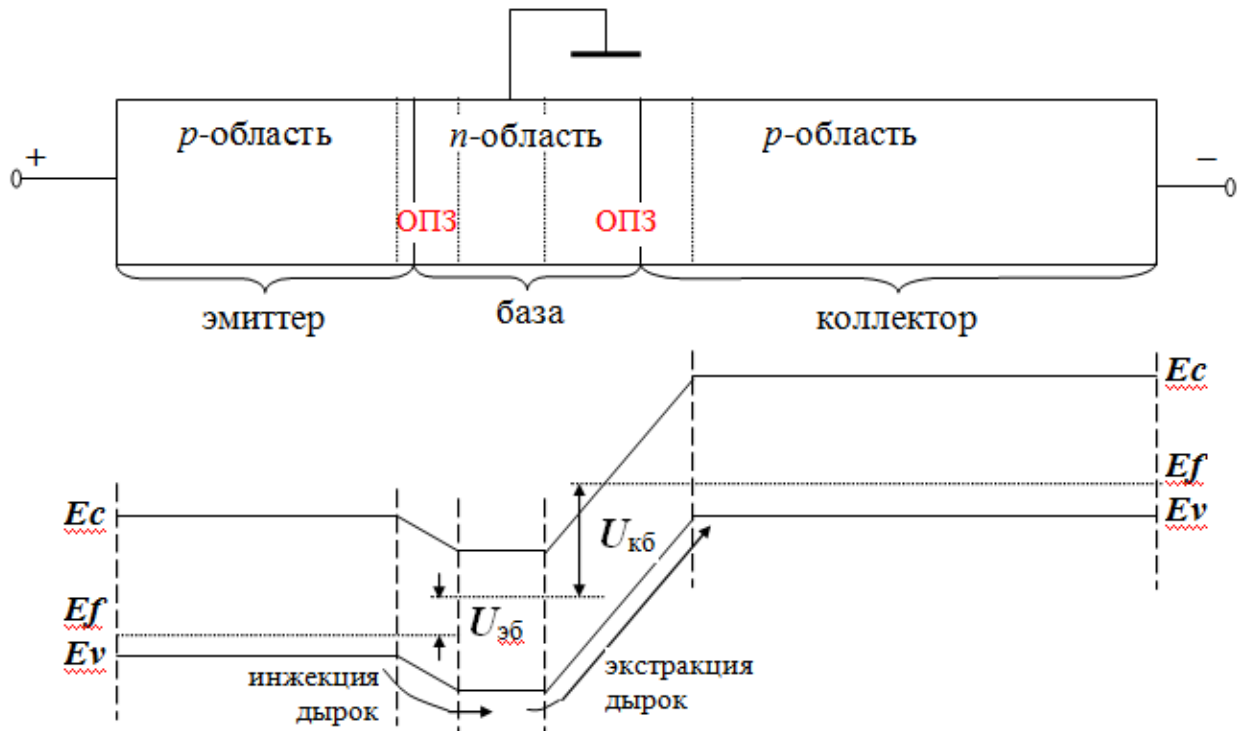


Биполярный транзистор – активный прибор, т.к. он позволяет осуществлять усиление мощности. Биполярный транзистор состоит из трех областей чередующегося типа электропроводности, которые образуют два *p-n*-перехода, расположенных в непосредственной близости один от другого. В зависимости от порядка расположения областей различают p-n-p и n-p-n-транзисторы.

В активном режиме работы транзистора (режиме усиления мощности) на эмиттерный переход подается прямое смещение, а на коллекторный переход – обратное.

В *p-n-p*-транзисторе эмиттерный *p-n*-переход при прямом смещении инжектирует дырки из эмиттера в базовую область транзистора. Если концентрация легирующей примеси в эмиттере значительно больше, чем в базе, то ток дырок $I_{\text{Э}p}$, инжектируемых в базу, будет практически равен полному току эмиттера $I_{\text{Э}}$. Эффективность эмиттера характеризуется

коэффициентом инжекции $\gamma = I_{Эр}/I_{Э}$, который должен быть близок к единице.



Часть дырок, инжектированных эмиттером, будет рекомбинировать в базе с электронами. Если толщина базы w много меньше диффузионной длины дырок в базе L_p , то большинство дырок дойдет до коллектора. Коллекторный переход смещен в обратном направлении, поэтому все дырки, дошедшие до ОПЗ коллектора, будут захвачены электрическим полем перехода и переброшены в квазинейтральную область коллектора – произойдет экстракция дырок коллектором. Эффективность перемещения неосновных носителей через базу характеризуется коэффициентом переноса $k = I_{Kp}/I_{Эр}$, где I_{Kp} – ток дырок, достигающих границы ОПЗ коллекторного перехода. Значение k в транзисторе с малым отношением w/L_p близко к единице.

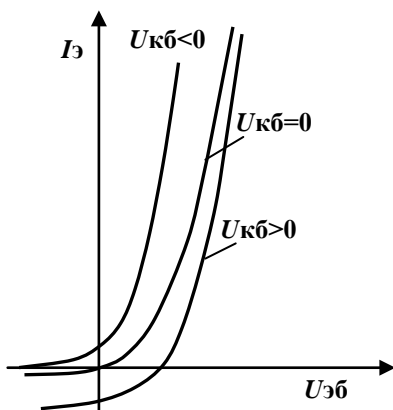
При токе эмиттера $I_{Э} = 0$ через коллекторный переход протекает обратный ток, обусловленный приложенным к нему обратным напряжением, как в изолированном p - n переходе $I_K = I_{KO} \left(e^{U_{KB}/\Phi_T} - 1 \right)$, где I_{KO} – обратный

ток насыщения коллекторного перехода. Учитывая, что управляемая эмиттером составляющая тока коллектора равна $\gamma_K I_{\text{Э}}$, полный ток коллектора:

$$I_K = \alpha_N I_{\text{Э}} - I_{\text{КО}} \left(e^{U_{\text{КБ}}/\Phi_T} - 1 \right),$$

где $\alpha_N = \gamma_K$ – коэффициент передачи тока эмиттера при нормальном включении, т.е., когда эмиттер инжектирует электроны, а коллектор – собирает. (Возможен и инверсный режим, когда коллектор инжектирует электроны, а эмиттер – собирает.)

Зависимостью $I_K(U_{\text{КБ}})$ при постоянном $I_{\text{Э}}$ определяется семейство выходных ВАХ транзистора с общей базой (базовый вывод на земле, он является общим для входной и выходной цепей). Семейство входных ВАХ транзистора с ОБ представляет собой зависимость $I_{\text{Э}}(U_{\text{ЭБ}})$, параметром семейства является $U_{\text{КБ}}$.



входные ВАХ p - n - p -транзистора с ОБ



выходные ВАХ p - n - p -транзистора с ОБ

В зависимости от соотношения полярности напряжений на p - n переходах различают активный (усилительный) режим, при котором эмиттер смещен прямо, а коллектор – обратно; режим насыщения, при котором коллекторный и эмиттерный переходы смещены в прямом направлении и инжектируют неосновные носители в базу; режим отсечки, при котором оба p - n перехода обратно смещены, ток коллектора очень мал и равен $I_{\text{КО}}$.

Физические процессы в биполярном транзисторе можно описать системой уравнений:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Э0}} \left(e^{U_{\text{ЭБ}}/\Phi_T} - 1 \right) - \alpha_I I_{\text{КО}} \left(e^{U_{\text{КБ}}/\Phi_T} - 1 \right),$$

$$I_{\text{К}} = \alpha_N I_{\text{Э0}} \left(e^{U_{\text{ЭБ}}/\Phi_T} - 1 \right) - I_{\text{КО}} \left(e^{U_{\text{КБ}}/\Phi_T} - 1 \right),$$

где α_N – нормальный коэффициент передачи тока, α_I – инверсный коэффициент передачи тока, $I_{\text{Э0}}$ и $I_{\text{КО}}$ собственные токи насыщения эмиттера и коллектора $I_{\text{Э0}} = S_{\text{Э}} (j_{\text{Эps}} + j_{\text{Эns}})$, $I_{\text{КО}} = S_{\text{К}} (j_{\text{Кps}} + j_{\text{Кns}})$.

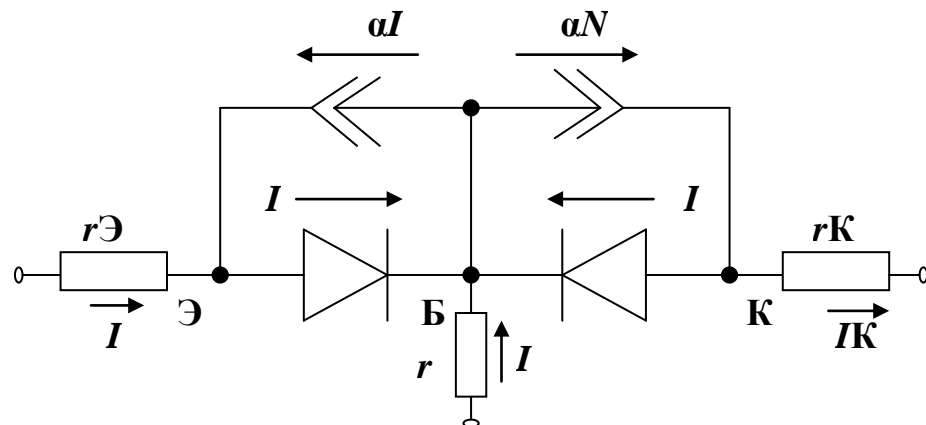
Эта система уравнений и электрическая модель, ей соответствующая, называются моделью Эберса-Молла. Для более полного представления свойств транзистора модель дополнена омическими сопротивлениями квазиэлектронейтральных областей эмиттера, базы и коллектора.

Коэффициент передачи тока эмиттера является важнейшим параметром транзистора. В *p-n-p*-транзисторе:

$$\alpha_N = \left[\left(1 + \frac{D_{n\text{Э}} N_{\text{Б}} L_{p\text{Б}}}{D_{p\text{Б}} N_{\text{Э}} L_{n\text{Э}}} \operatorname{th} \frac{w}{L_{p\text{Б}}} \right) \operatorname{ch} \left(\frac{w}{L_{p\text{Б}}} \right) \right]^{-1},$$

$$\alpha_I = \left(1 + \frac{D_{n\text{К}} N_{\text{Б}} L_{p\text{Б}}}{D_{p\text{Б}} N_{\text{К}} L_{n\text{К}}} \operatorname{th} \frac{w}{L_{p\text{Б}}} \right)^{-1} \frac{S_{\text{Э}}}{S_{\text{К}} \operatorname{ch} \left(\frac{w}{L_{p\text{Б}}} \right)},$$

где $N_{\text{Б}}$, $N_{\text{Э}}$, $N_{\text{К}}$ – концентрации легирующей примеси в базе, эмиттере, коллекторе, $S_{\text{Э}}$ и $S_{\text{К}}$ – площадь эмиттера и площадь коллектора.

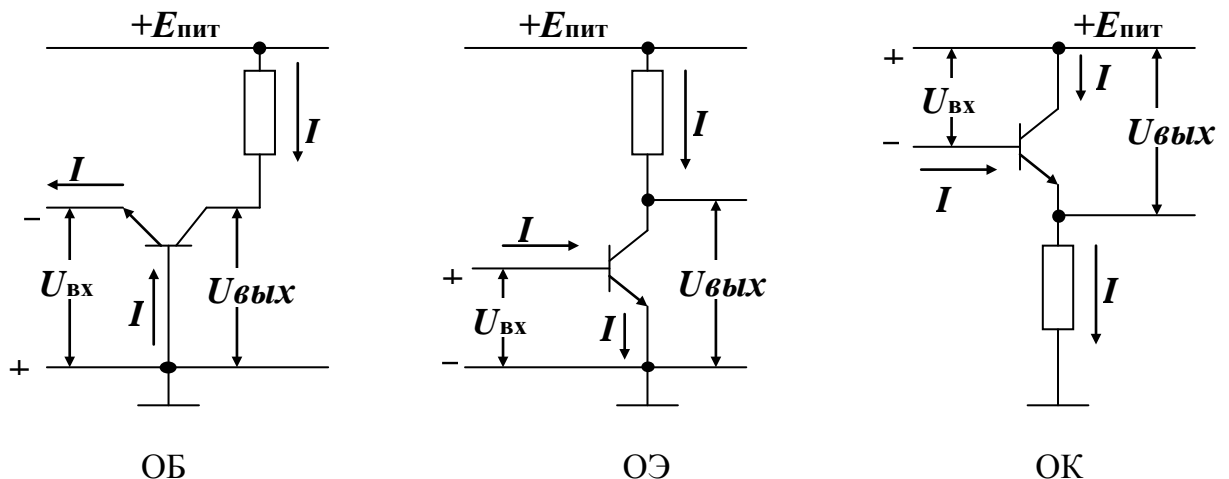


Эквивалентная схема модели Эберса-Молла

При повышенном обратном напряжении на ОПЗ коллектора электроны могут вызвать ударную ионизацию носителей заряда, произойдет лавинное умножение носителей, все токи, пересекающие переход, увеличатся в M раз (M – коэффициент лавинного умножения). Лавинное умножение может приводить к нестабильной работе транзистора, поэтому при усилении электрических сигналов такой режим не используют. Задают такое U_K , что $M \approx 1$.

§2. Схемы включения биполярного транзистора.

Транзистор может быть включен по схеме с общей базой, с общим эмиттером (база – вход, коллектор – выход) и общим коллектором (база – вход, эмиттер – выход).



Для транзистора с ОБ коэффициент усиления по току $\Delta I_{ВЫХ} / \Delta I_{ВХ} = \alpha_N < 1$, т.е. усиления тока не происходит. Однако транзистор с ОБ позволяет получить большое усиление по напряжению ($\Delta U_{ВЫХ} / \Delta U_{ВХ}$). Коэффициент усиления по мощности ($\Delta P_{ВЫХ} / \Delta P_{ВХ}$) транзистора с ОБ может быть заметно больше единицы.

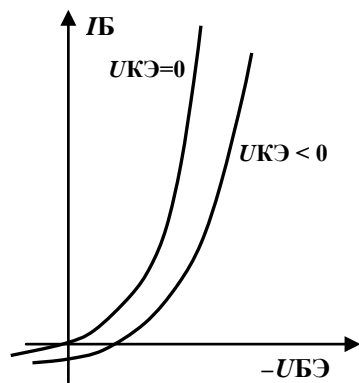
В транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, имеет место усиление не только по напряжению, но и по току. В соответствии с первым законом Кирхгофа $I_Э = I_K + I_B$, откуда:

$$I_K = \frac{\alpha_N}{(1 - \alpha_N)} I_B - \frac{I_{KO}}{(1 - \alpha_N)} \left(e^{U_{KЭ} / \varphi_T} - 1 \right).$$

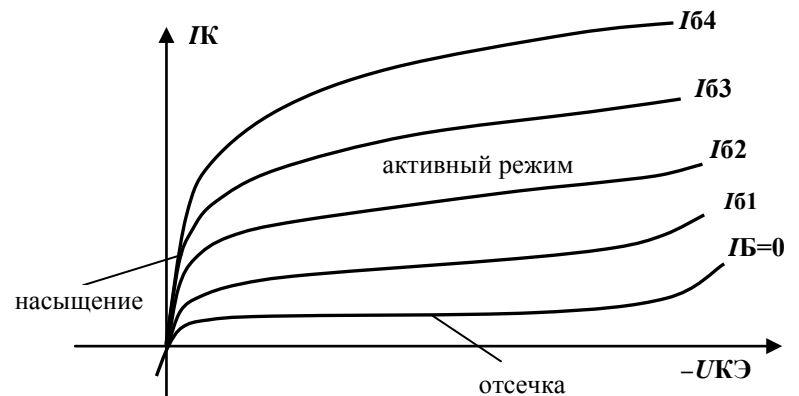
Это выражение определяет семейство выходных ВАХ транзистора с ОЭ (зависимости I_K от $U_{КЭ}$ при $I_B = \text{const}$). Множитель перед током I_B – коэффициент усиления по току транзистора с ОЭ, он называется коэффициентом передачи тока базы $\beta_N = \alpha_N / (1 - \alpha_N)$. У изготавливаемых промышленностью транзисторов типичные значения α_N лежат в диапазоне от 0,9 до 0,995, что соответствует β_N от 9 до 200.

Коэффициент усиления по мощности транзистора с ОЭ может быть значительным, т.к. имеется усиление и по току, и по напряжению, поэтому в большинстве усилительных каскадов используется транзистор с ОЭ.

Семейство входных характеристик транзистора с ОЭ представляет собой зависимость $I_B(U_{БЭ})$ при постоянном $U_{КЭ}$.



входные ВАХ $p-n-p$ -транзистора с ОЭ



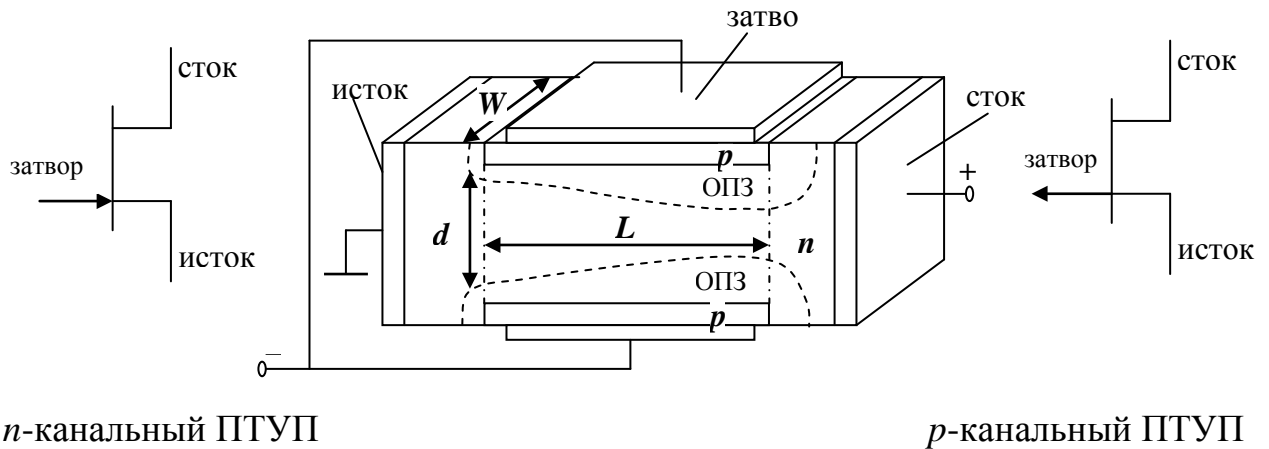
выходные ВАХ $p-n-p$ -транзистора с ОЭ

Транзистор с ОК имеет коэффициент усиления по напряжению незначительно меньше единицы. (Потенциал эмиттера практически повторяет потенциал базы, поэтому каскад на основе транзистора с ОК называют эмиттерным повторителем.) Усиление по току значительно и равно $\beta_N + 1$.

§3. Полевые транзисторы.

Полевые транзисторы – униполярные полупроводниковые приборы, в которых ток переносится носителями одного знака, а принцип работы состоит в изменении сопротивления проводящей области (канала) при приложении поперечного напряжения.

В полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом (ПТУП) сопротивление канала изменяется за счет расширения ОПЗ p-n-перехода при приложении к нему обратного напряжения.



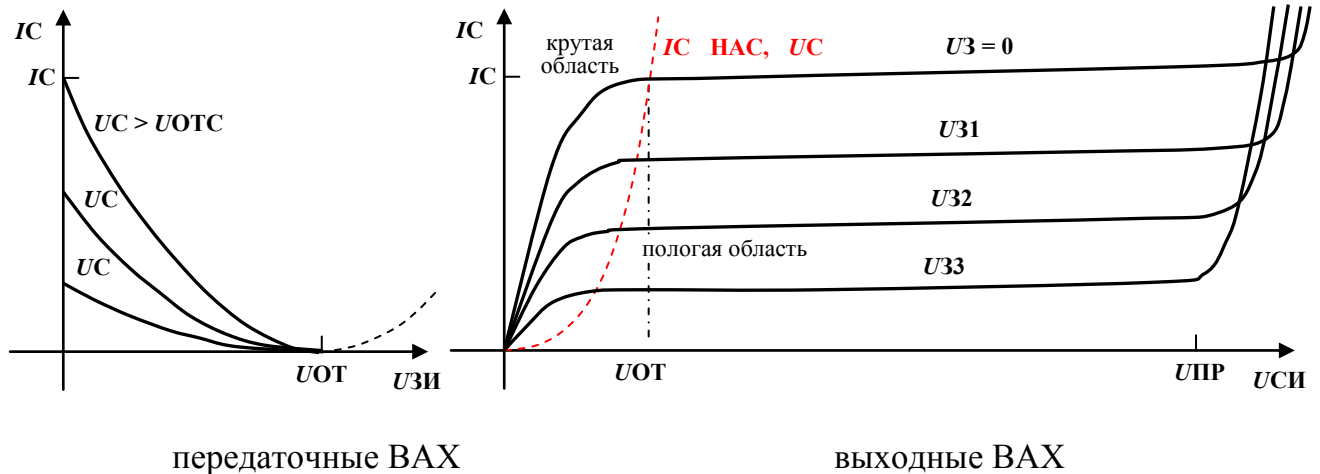
Концентрация легирующей примеси в затворных областях выше, чем в области канала, поэтому ОПЗ будет распространяться главным образом в канал. Если напряжение между стоком и истоком $U_{СИ} = 0$, ОПЗ будет перекрывать канал равномерно по всей длине. Напряжение на затворе, при котором ОПЗ p-n-переходов сомкнутся, перекрыв путь для протекания тока между стоком и истоком, называется напряжением отсечки $U_{З\text{отс}}$.

Приравняв $l_{\text{ОПЗ}}$ к половине толщины канала без приложения напряжения ($d_o/2$), и учитывая, что $N_d \ll N_a$ (для *n*-канального ПТУП), найдем напряжение отсечки:

$$U_{З\text{отс}} = \frac{qN_d d_o^2}{8\epsilon\epsilon_o} - \phi_k \quad (\text{здесь и далее абсолютная величина } U_3 \text{ и } U_C).$$

При подаче напряжения между стоком и истоком обратное напряжение, приложенное к p-n-переходу в области стока, равно сумме приложенных напряжений $U = U_3 + U_C$, поэтому канал перекрывается неравномерно, сужаясь по направлению к стоку. Когда сумма напряжений $U_3 + U_C$ достигнет напряжения отсечки, канал перекроется областью пространственного заряда, тем не менее, ток между стоком и истоком будет течь, поскольку электрическое поле перебрасывает носители заряда через ОПЗ.

Для ПТУП рассматривают выходные ВАХ (выходом является сток) и передаточные ВАХ (зависимости тока выхода от напряжения на управляющем электроде – затворе).



При малых напряжениях на стоке $U_C \ll U_{OTC}$ форма канала практически не изменяется, транзистор представляет собой резистор, сопротивление которого зависит от напряжения на затворе: $R = \rho L / (Wd)$, где ρ – удельное сопротивление, L – длина канала, W – ширина канала, d – толщина канала, зависящая от U_3 . Выходная ВАХ представляет собой прямые линии, наклон которых зависит от напряжения на затворе.

По мере увеличения напряжения на стоке, сечение канала уменьшается возле стока. Сопротивление канала увеличивается, рост тока замедляется. При $U_3 + U_C = U_{OTC}$ канал перекрывается ОПЗ, рост тока прекращается (в идеале), наступает насыщение ВАХ.

В крутой области ВАХ ток стока связан с напряжением на затворе и стоке следующим соотношением:

$$I_C = \frac{1}{R_0} \left(U_C - \frac{2}{3} \frac{(\varphi_k + U_3 + U_C)^{3/2} - (\varphi_k + U_3)^{3/2}}{(\varphi_k + U_{OTC})^{1/2}} \right),$$

где R_0 – сопротивление полностью открытого канала. Зависимости $I_C(U_C)$ представляют собой кривые параболического типа с экстремумом ($I_{C \text{ НАС}}$) при $U_3 + U_C = U_{OTC}$. После достижения насыщения ток стока можно считать постоянным, равным $I_{C \text{ НАС}}$.

Ток стока насыщения будет максимальным при $U_3 = 0$. $I_{C \max}$ можно рассчитать по упрощенной формуле: $I_{C \max} \approx U_{OTC} / 3R_O$. Тогда ток стока насыщения:

$$I_C = I_{C \max} \left(1 - \frac{U_3}{U_{OTC}} \right)^2.$$

По этой формуле рассчитывается передаточная характеристика в области насыщения.

Одним из основных параметров полевого транзистора, характеризующих его усилительные свойства, является крутизна передаточной характеристики, определяемая как $S = dI_C/dU_3$ при $U_C = const$. Крутизна в пологой области ВАХ (используемой в усилительном режиме работы) равна:

$$S = -\frac{2I_{C \max}}{U_{OTC}} \left(1 - \frac{U_3}{U_{OTC}} \right).$$

Вторым важным параметром полевого транзистора считается проводимость канала в крутой области ВАХ, определяемая как $g_K = dI_C/dU_C$ при $U_3 = const$.

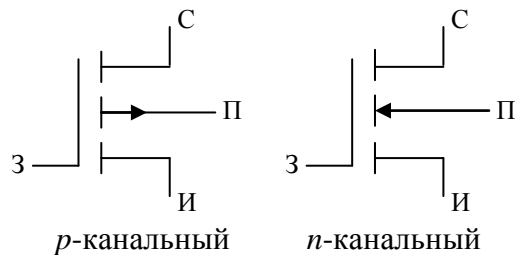
§4. МДП транзисторы.

Полевые транзисторы с изолированным затвором относятся к униполярным полупроводниковым приборам, принцип работы которых основан на изменении электрического сопротивления поверхностной области полупроводника под воздействием эффекта поля. Основу прибора составляет структура металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).

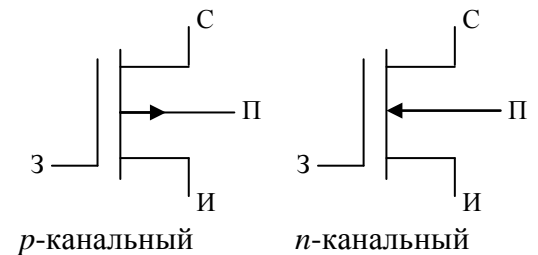
Различают МДП-транзисторы с встроенным и индуцированным каналом. В МДП-транзисторе с индуцированным каналом сток и исток разделены областью с другим типом проводимости. При приложении напряжения к затвору в подзатворной области вследствие эффекта поля меняется тип проводимости и образуется канал. По характеру ВАХ это нормально закрытый прибор (при нуле на затворе ток между стоком и истоком не течет).

В МДП-транзисторе со встроенным каналом между стоком и истоком создана область с тем же типом проводимости – канал, сопротивление которого меняется при приложении напряжения к затвору. Это нормально открытый прибор (ток между стоком и истоком может протекать при нуле на затворе).

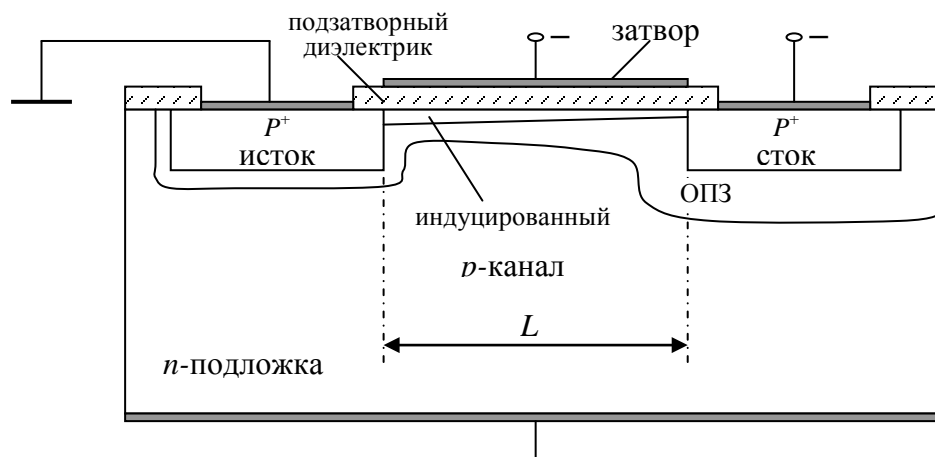
МДП-транзисторы с индуцированным каналом



МДП-транзисторы со встроенным каналом



Наиболее широко используются МДП-транзисторы с индуцированным каналом. На них построены почти все современные интегральные схемы. Мы будем рассматривать МДП-транзистор с индуцированным p -каналом.

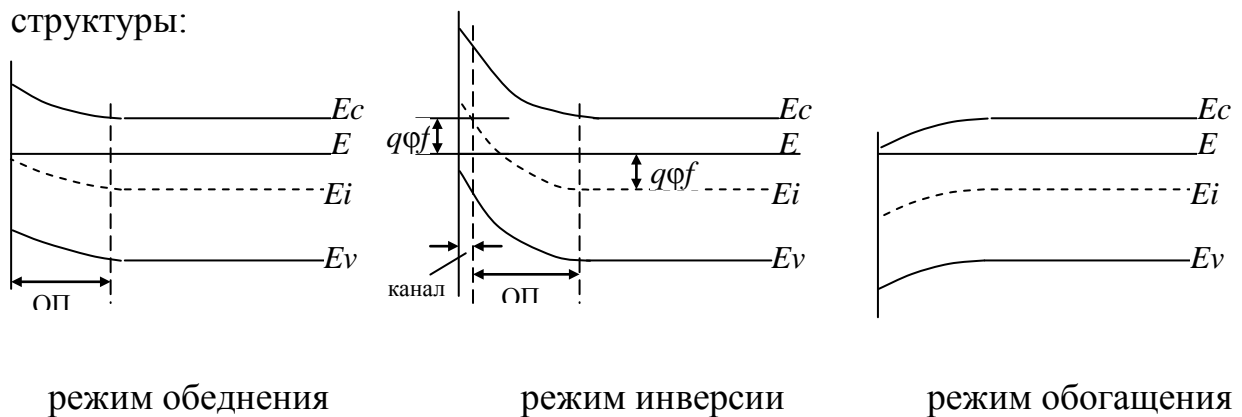


В полупроводнике n -типа созданы сильнолегированные области p -типа – исток и сток (расстояние между ними – длина канала L). Над областью образования канала расположен затвор, отделенный от полупроводника диэлектриком. (В кремниевых транзисторах в качестве диэлектрика используют обычно оксид кремния SiO_2 , в этом случае прибор называют МОП-транзистором).

При нулевом смещении на затворе ток между стоком и истоком будет равен току обратно смещенного p - n перехода сток – подложка. Если на

затвор подан отрицательный потенциал, электроны под действием электрического поля оттесняются от поверхности, а дырки – притягиваются. Таким образом, происходит смена проводимости приповерхностного слоя с n -типа на p -тип – инверсия типа проводимости. Между истоком и стоком возникает канал с тем же типом основных носителей, и при приложении напряжения $U_{СИ}$ будет течь ток I_C . Напряжение на затворе $U_{ЗИ}$, при котором меняется тип электропроводности полупроводника под затвором, называют **пороговым** $U_{ПОР}$.

Энергетические зонные диаграммы полупроводника под затвором МДП-структуры:



При отрицательном смещении на затворе энергетические зоны будут искривляться вверх тем сильнее, чем выше смещение. Концентрация электронов вблизи поверхности уменьшается, а концентрация дырок – возрастает (режим обеднения). Когда концентрация неосновных носителей превысит концентрацию основных (в данном случае электронов) произойдет инверсия проводимости. Но для того, чтобы проводящий канал был эффективен, концентрация дырок должна превысить равновесную концентрацию электронов в объеме полупроводника $n_{но}$. Напряжение затвора, соответствующее этому граничному режиму – пороговое. При $U_3 > U_{ПОР}$ существует индуцированный канал (это режим сильной инверсии). При положительном смещении на затворе энергетические зоны изгибаются вниз, концентрация электронов у поверхности возрастает. Это режим обогащения. (В SiO_2 существует положительный заряд поверхностных состояний, поэтому при $U_3 = 0$ будет режим обогащения.).

Пороговое напряжение:

$$U_{\text{ПОР}} = \varphi_{\text{SO}} + (Q_{\text{ПОВ}} + Q_{\text{ОПЗ}}) / C_{\text{Д}},$$

где φ_{SO} – поверхностный потенциал при граничных условиях сильной инверсии, $\varphi_{\text{SO}} = 2 \varphi_f = 2 \varphi_T \ln(N_d / n_i)$,

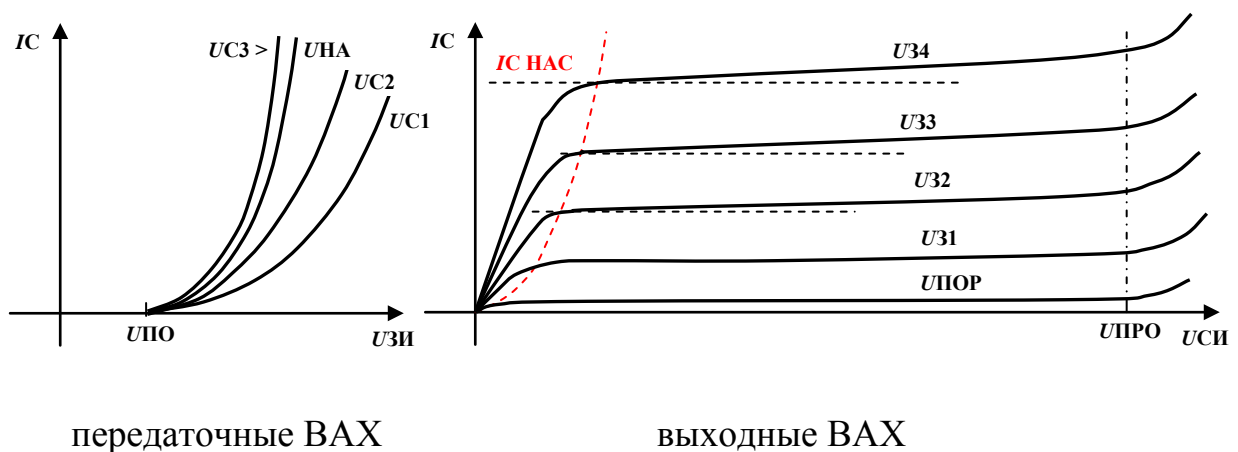
$Q_{\text{ПОВ}}$ – заряд поверхностных состояний диэлектрика [Кл/см²],

$Q_{\text{ОПЗ}}$ – заряд ОПЗ, $Q_{\text{ОПЗ}} = q N_d l_{\text{ОПЗ}}$, ширина ОПЗ: $l_{\text{ОПЗ}} = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_n \varepsilon_0 \varphi_{\text{SO}}}{q N_d}}$,

$C_{\text{Д}}$ – удельная емкость МДП-структуры, представляющей собой плоский конденсатор, $C_{\text{Д}} = \varepsilon_{\text{Д}} \varepsilon_0 / t_{\text{Д}}$ [Ф/см²], $\varepsilon_{\text{Д}}$ и $t_{\text{Д}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость и толщина подзатворного диэлектрика.

При протекании тока по каналу потенциал канала по мере приближения к стоку становится более отрицательным, поэтому разность потенциалов между затвором и полупроводником, индуцирующая подвижный заряд в канале, уменьшается по мере приближения к стоку. Толщина канала возле стока уменьшается, а ширина ОПЗ – растет. Из-за этого с ростом $U_{\text{СИ}}$ наблюдается замедление роста $I_{\text{С}}$. При $U_{\text{СИ}} = U_3 - U_{\text{ПОР}}$ толщина канала у стока становится равной нулю, ток стока достигает насыщения (переход от крутого участка ВАХ к пологому).

Выходные и передаточные ВАХ МДП-транзистора:



В крутой области характеристик ток стока:

$$I_{\text{С}} = b [(U_3 - U_{\text{ПОР}}) U_{\text{С}} - 0,5 U_{\text{С}}^2],$$

где коэффициент b – удельная крутизна [А/В²], $b = \mu_p W C_D / L$ (L и W – длина и ширина канала).

В пологой области характеристик ток стока:

$$I_C = 0,5 b (U_3 - U_{\text{ПОР}})^2.$$

(Здесь I_C не зависит явно от U_C , но b увеличивается с ростом U_C за счет уменьшения длины канала).

Крутизна передаточной характеристики (dI_C/dU_3 при $U_C = \text{const}$) в пологой области ВАХ:

$$S = b (U_{3И} - U_{\text{ПОР}}).$$

Зависимость крутизны S от выходного тока I_C (в пологой области): $S = \sqrt{2bI_C}$.

На подложку может быть подано положительное напряжение $U_{\text{ПИ}}$. Тогда обратное смещение, приложенное к ОПЗ, возрастает до $\phi_{SO} + U_{\text{ПИ}}$. Соответственно возрастут ширина ОПЗ ($l_{\text{ОПЗ}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_n \varepsilon_0 (\phi_{SO} + U_{\text{ПИ}})}{qN_d}}$), ее заряд и пороговое напряжение.