

Униполярные транзисторы

Различают два вида полевых транзисторов:

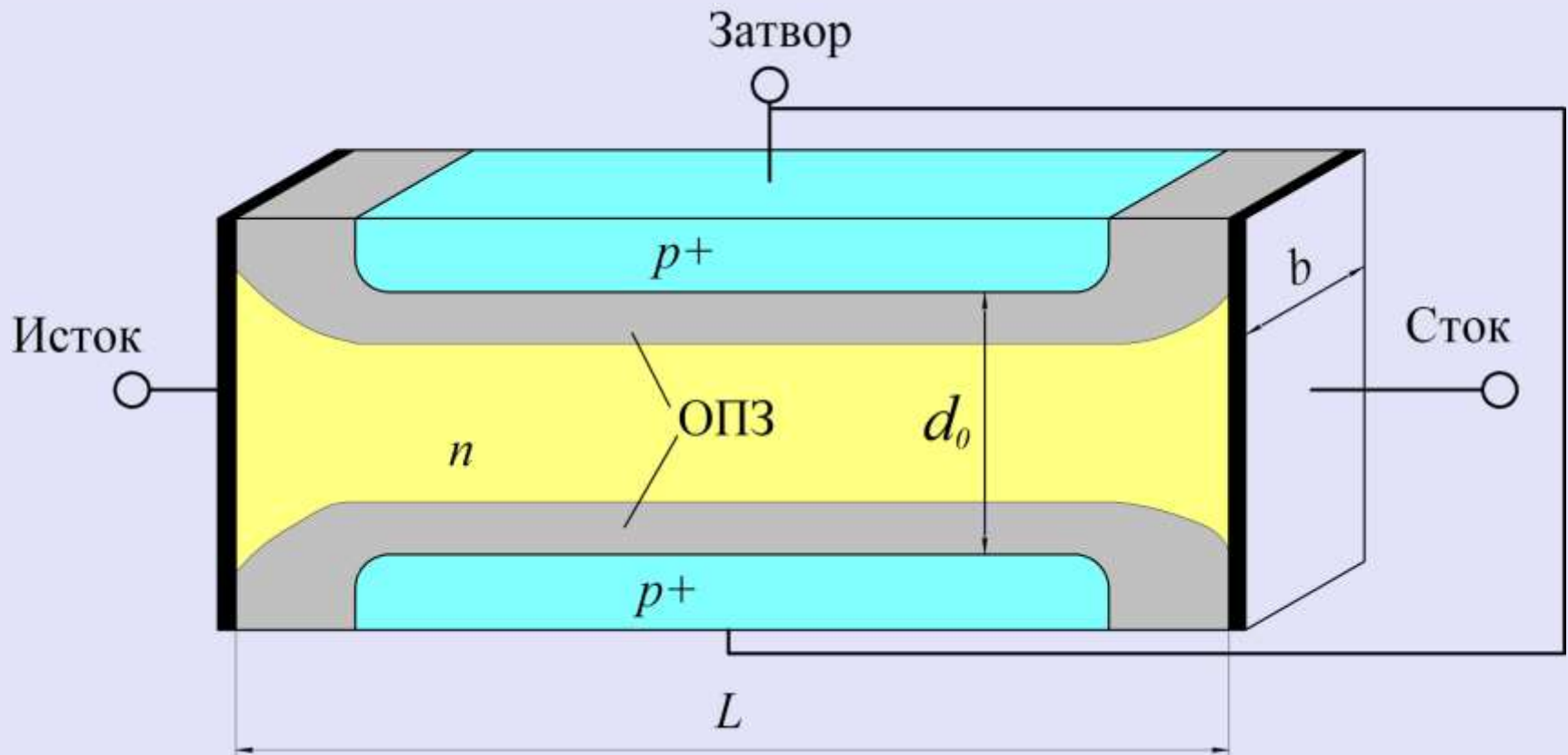
- с управляющим *pn*-переходом
- со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП- транзисторы)

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

С помощью pn -перехода, включенного в обратном направлении, возможно в объеме кристалла создать область с управляемым сечением, *каналом*, представляющим собой слаболегированный слой полупроводника.

Поскольку в таких структурах мощность, затрачиваемая на управление сечением канала, значительно меньше мощности, которую может отдавать в нагрузку проходящий через сечение управляемый ток, то такие структуры нашли применение в усилительных приборах, названных *полевыми транзисторами с управляющим pn -переходом*, или просто *полевые транзисторы*.

Структура транзистора с управляющим p - n -переходом



В ПТУП область затвора отделена от объема канала *p-n*-переходом, смещенным в *обратном направлении*.

При отсутствии напряжения на затворе сопротивление канала мало, т.е. ПТУП – *нормально открытый прибор*.

$$R_{k0} = \rho \cdot L / S = \frac{\rho \cdot L}{d_0 \cdot b}$$

На управляющий pn -переход можно подавать только *обратное напряжение*, и поэтому ПТУП работает в режиме обеднения канала носителями заряда.

При изменении потенциала затвора происходит изменение ширины области пространственного заряда (ОПЗ) pn -перехода и соответственно изменение сечения канала.

Поскольку ОПЗ обладает высоким сопротивлением, изменение сечения канала будет приводить к изменению тока через него, именно этот эффект и используется для управления током, проходящим через канал.

В отличие от биполярных транзисторов в данном случае управление осуществляется потоком основных носителей заряда.

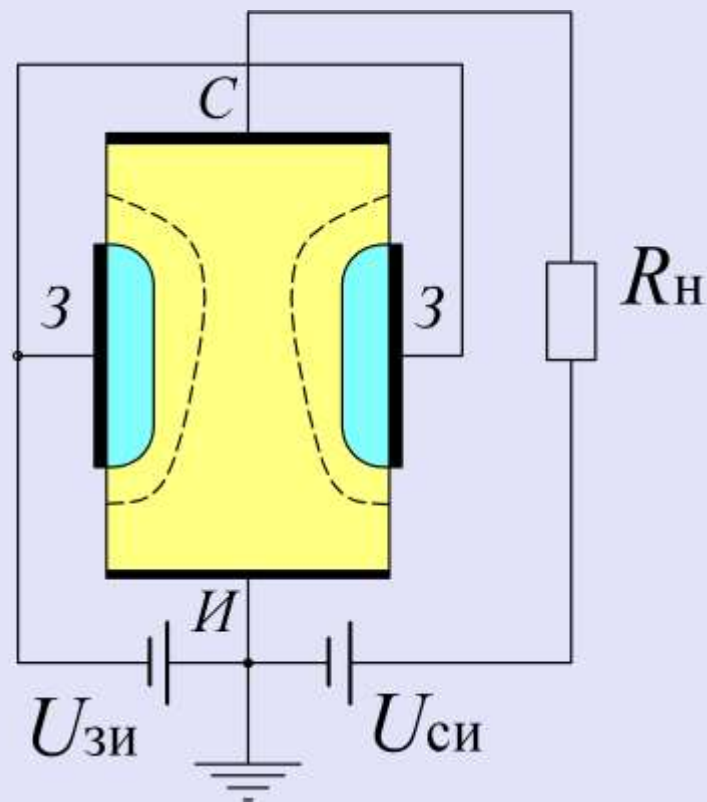
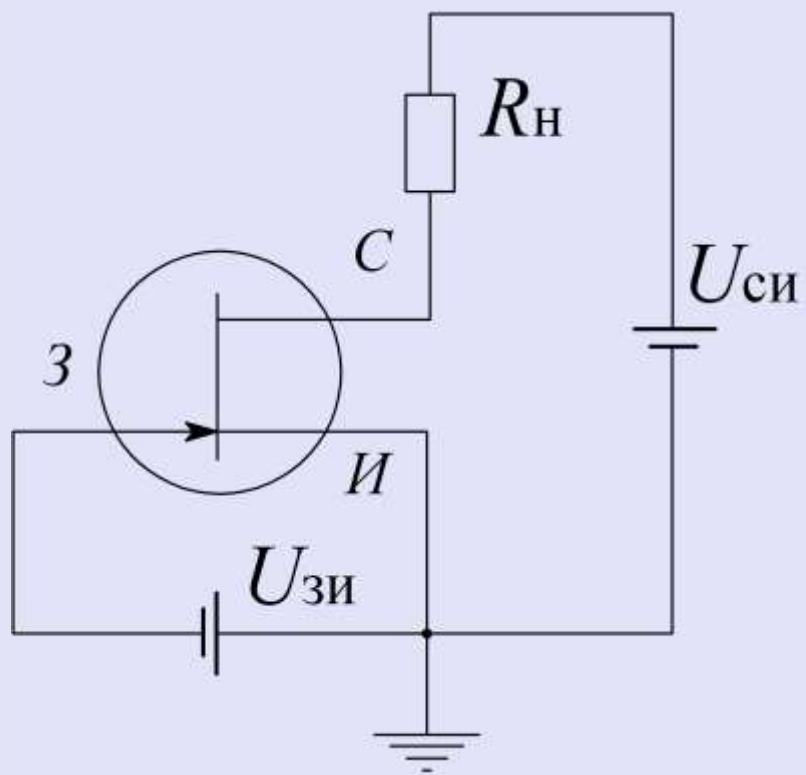
Поэтому принципиально данные транзисторы могут быть более быстродействующими, чем биполярные, поскольку в них отсутствует накопление избыточного заряда и не требуется время на его создание и рассасывание при изменении входного сигнала.

Процессы в канале ПТУП при $U_{cu} = 0$

При подаче обратного смещения на затвор относительно истока (U_{zu}) ОПЗ расширяется, соответственно, толщина проводящего канала уменьшается, и сопротивление канала увеличивается:

$$d = d_0 - 2w(U_{zu}) = d_0 - 2\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s}{q} \frac{(U_{zu} + \varphi_K)}{N_d}}$$

Обозначение и схема включения



При некотором значении U_{zu} ОПЗ занимает весь канал ($2w = d_0$) – происходит так называемая *отсечка канала*.

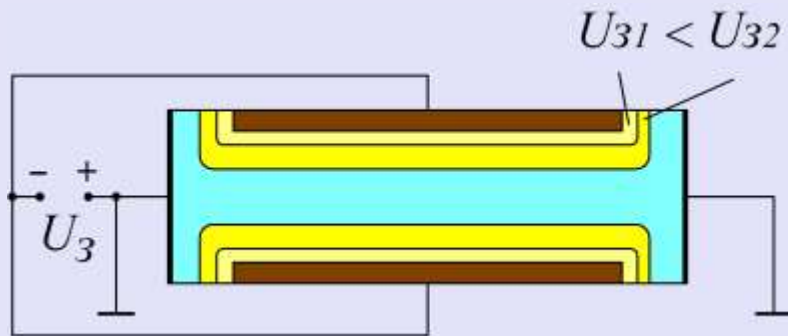
При $d=0$:

$$U_{отс} = \left(q \cdot N_d / 8 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s \right) \cdot d_0^2 - \varphi_K$$

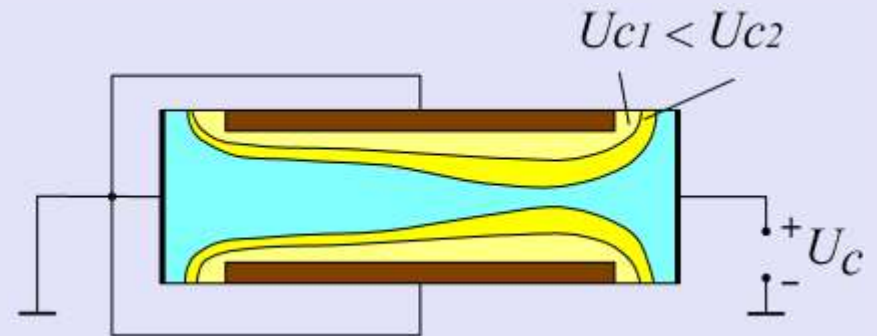
$$d = d_0 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{U_{zu} + \varphi_K}{U_{отс} + \varphi_K}} \right)$$

$$d = d_0 \left(1 - \sqrt{\frac{U_{zu} + U(x) + \varphi_K}{U_{отс} + \varphi_K}} \right)$$

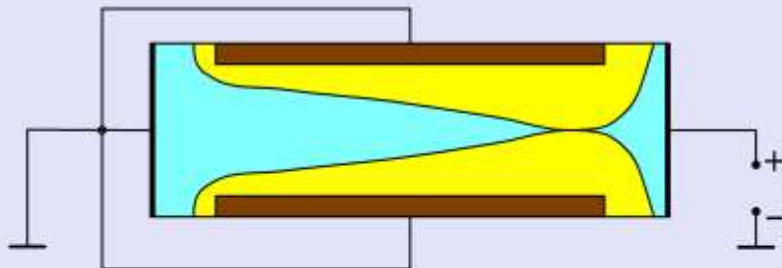
Форма канала при различных значениях напряжений на затворе и стоке



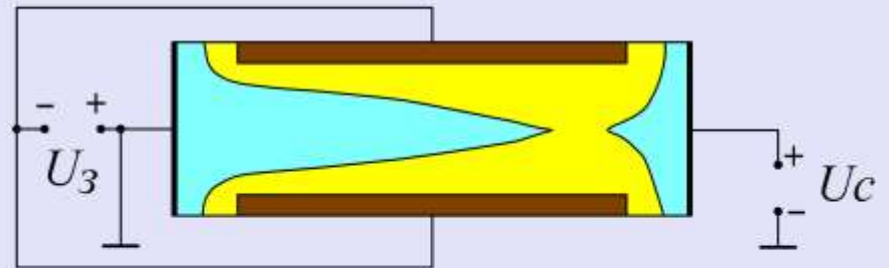
$$U_c = 0 \quad U_3 = \text{var}$$



$$U_{c\text{отс}} > U_c > 0 \quad U_3 = 0$$



$$U_c = U_{c\text{отс}} \quad U_3 = 0$$



$$U_c > U_{c\text{отс}} \quad U_3 = \text{var}$$

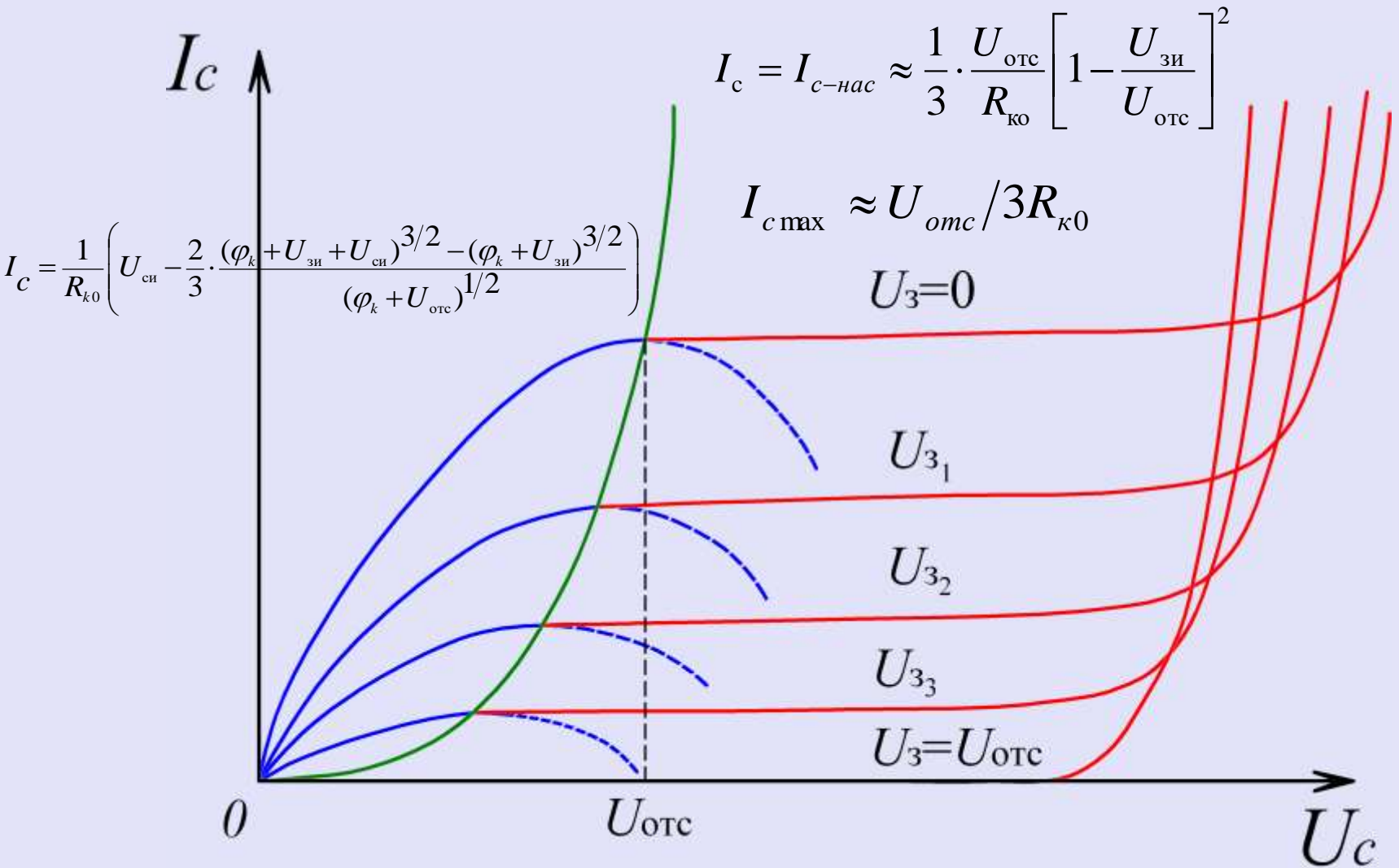
Вольт-амперные характеристики ПТУП

Для полевых транзисторов представляют интерес два вида вольтамперных характеристик: *стоковые* и *стоко-затворные*

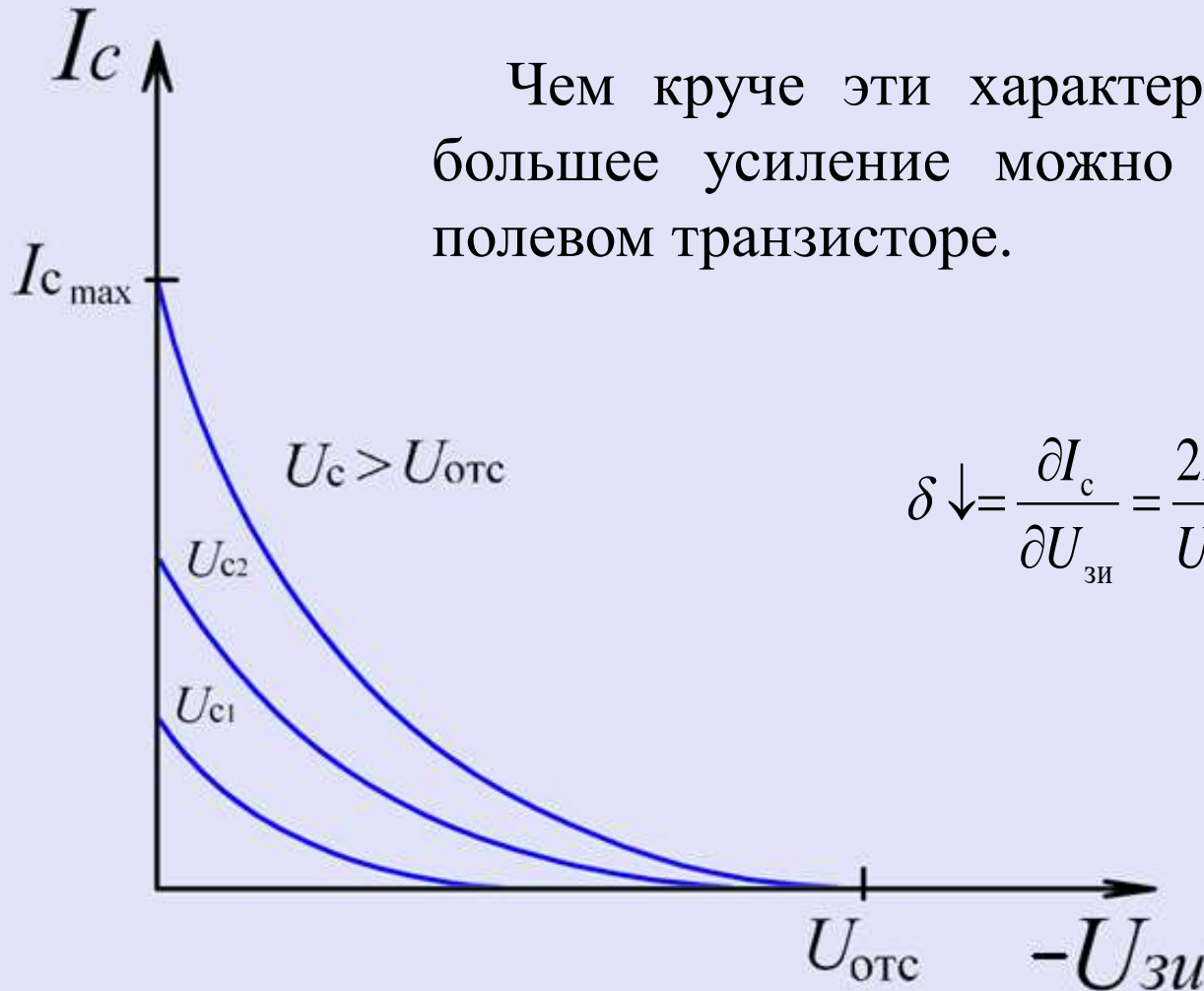
Входная характеристика ПТУП соответствует вольт-амперной характеристике *pn*-перехода. Она представляет ВАХ диода затвор-исток.

Выходные характеристики ПТУП представляют собой зависимости тока стока I_c от напряжения между истоком и стоком U_c , измеренные при различных значениях потенциала затвора U_z

Выходная характеристика ПТУП



Передаточная характеристика ПТУП



Чем круче эти характеристики, тем большее усиление можно получить в полевом транзисторе.

$$\delta \downarrow = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} = \frac{2I_{cm}}{U_{отс}} \left(1 - \frac{U_{зи} \uparrow}{U_{отс}} \right)$$

Расчет характеристик ПТУП

$$dR_x = \rho \cdot dx / [b \cdot d(x)] \quad (10.1)$$

$$S = b \cdot d_0 - b \cdot d(x) = b \cdot d_0 \left(1 - \sqrt{\frac{U_{зи} + U_{си}(x) + \varphi_K}{U_{отс} + \varphi_K}} \right) \quad (10.2)$$

$$dU = I_c \cdot \rho \cdot dx / S = \frac{I_c \cdot \rho \cdot dx}{b \cdot d_0} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{зи} + U_{си}(x) + \varphi_K}{U_{отс} + \varphi_K}} \right)^{-1} \quad (10.3)$$

$$I_c = \frac{1}{R_{k0}} \left(U_{си} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(\varphi_K + U_{зи} + U_{си})^{3/2} - (\varphi_K + U_{зи})^{3/2}}{(U_{отс} + \varphi_K)^{1/2}} \right) \quad (10.4)$$

$$I_c = I_{c-нас} \approx \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{отс}}{R_{к0}} \left[1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right]^2 \quad (10.5)$$

При $U_{з} = 0$

$$I_c = I_{cmax} \left[1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right]^2 \quad (10.6)$$

Крутизна транзистора:

$$\delta = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} = \frac{2I_{cm}}{U_{отс}} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right) \quad (10.7)$$

Влияние температуры на параметры транзистора с управляющим переходом

Изменение ВАХ ПТУП с температурой определяется температурной зависимостью начальной проводимости канала $R_{к0}$ и, соответственно, максимального тока $I_{сmax}$, а также напряжения отсечки U .

Эти параметры влияют как на вид ВАХ, так и на величину крутизны.

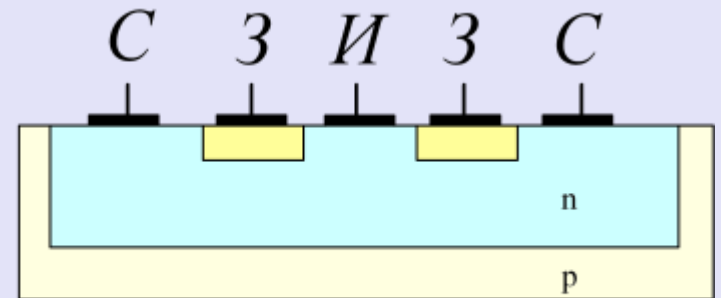
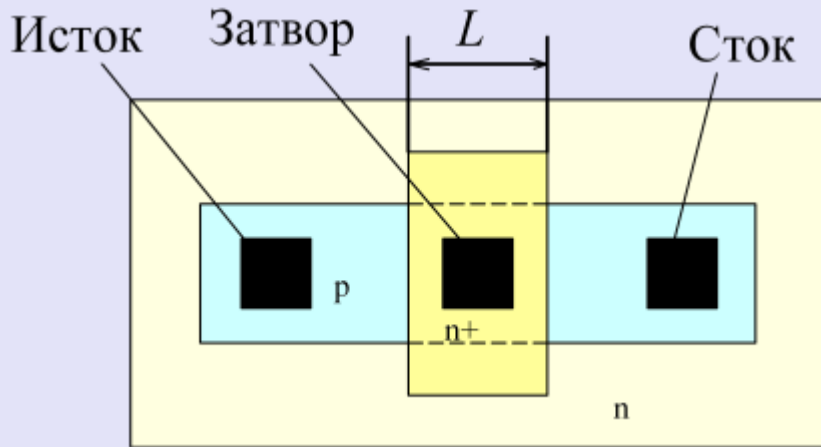
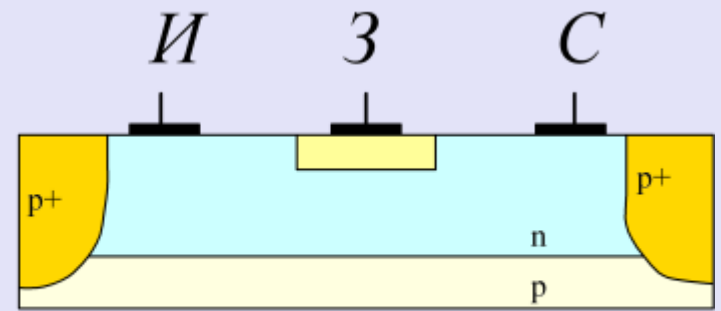
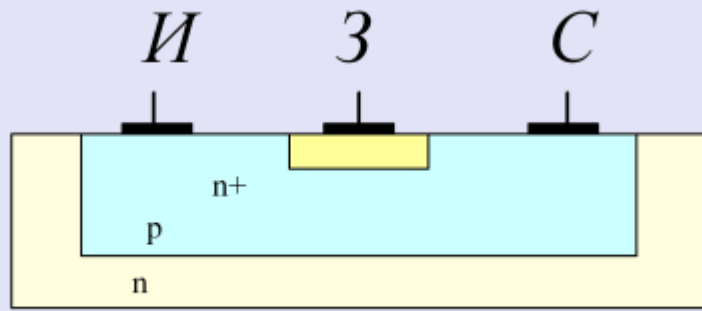
С ростом напряжения затвора крутизна для полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом падает.

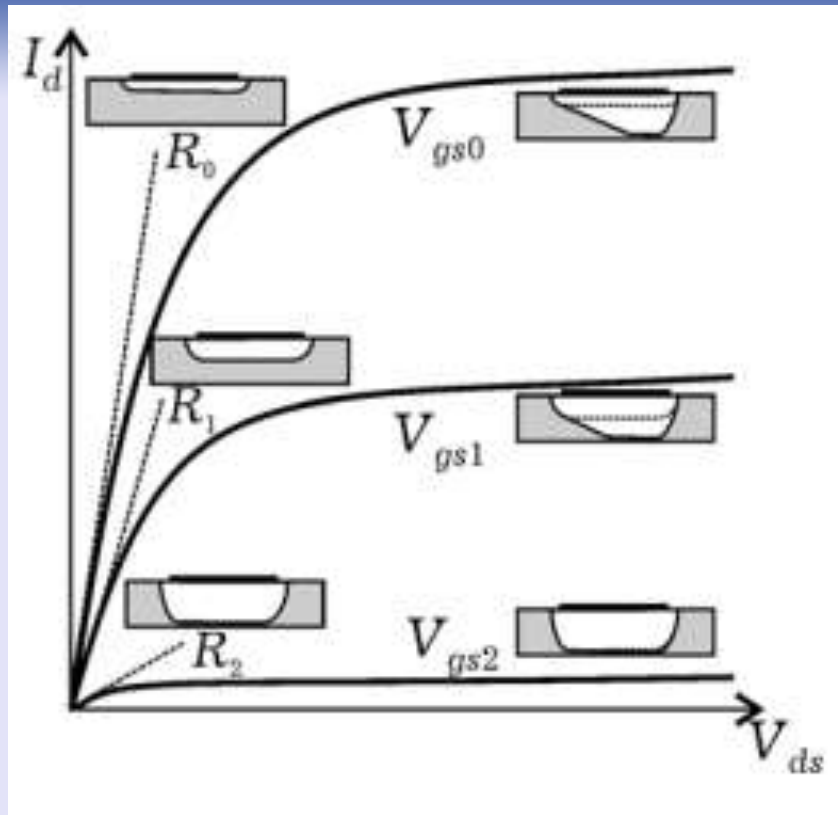
$$\frac{\partial U_{\text{отс}} \uparrow}{\partial T \uparrow} = - \frac{\partial \phi_K \downarrow}{\partial T \uparrow}$$

С увеличением температуры контактная разность потенциалов линейно уменьшается, следовательно, с ростом температуры напряжение отсечки будет возрастать

В настоящее время разработаны ПТУП на основе GaAs, SiC, Ge, однако наибольшее распространение получили приборы на основе **Si**.

Варианты конструкции ПТУП





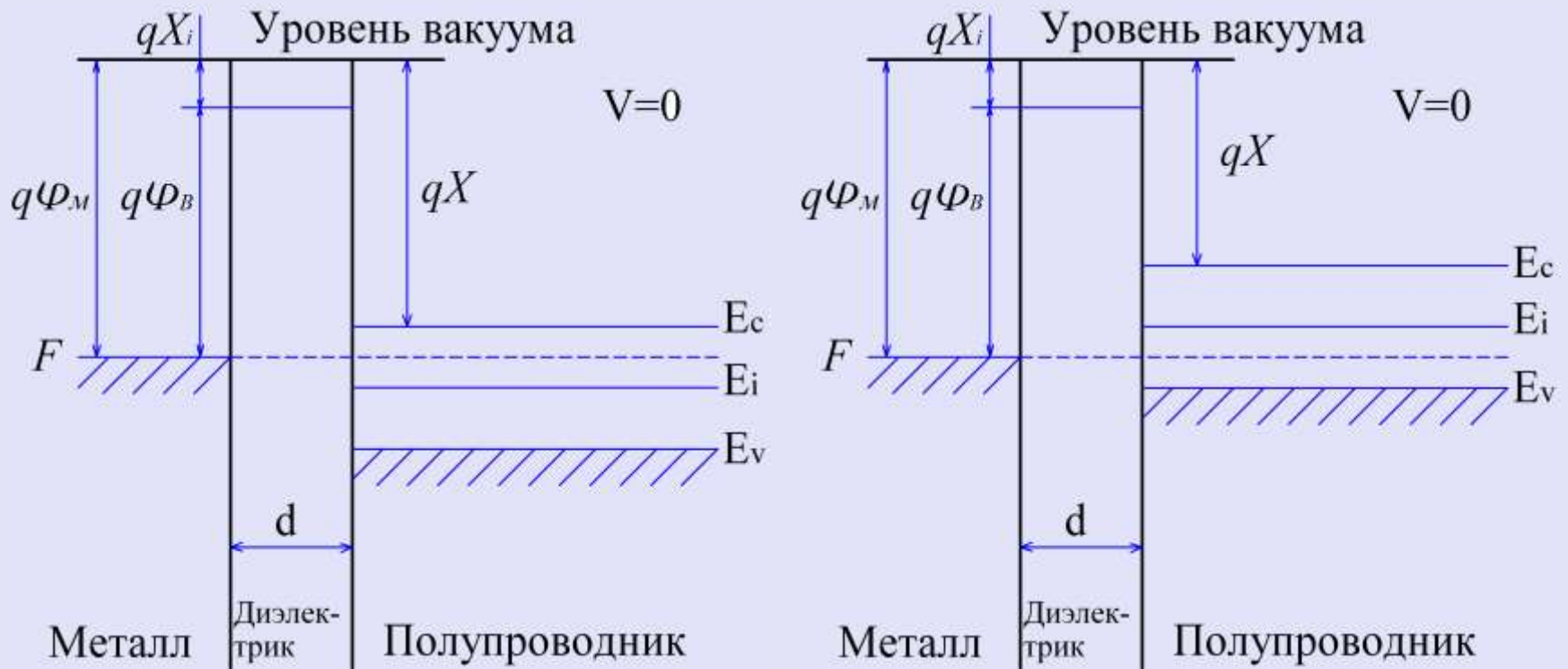
ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ КАНАЛА ПРИ РАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ ЗАТВОРА И СТОКА

Идеальная МДП–структура

Если на окисел, покрывающий поверхность кристалла, нанести металлический электрод (затвор), то, изменяя его потенциал относительно объема кристалла, возможно изменять величину заряда в приповерхностной области полупроводника и, соответственно, её проводимость.

Этот эффект положен в основу целого ряда полупроводниковых устройств, среди которых самое известное – МДП-транзистор.

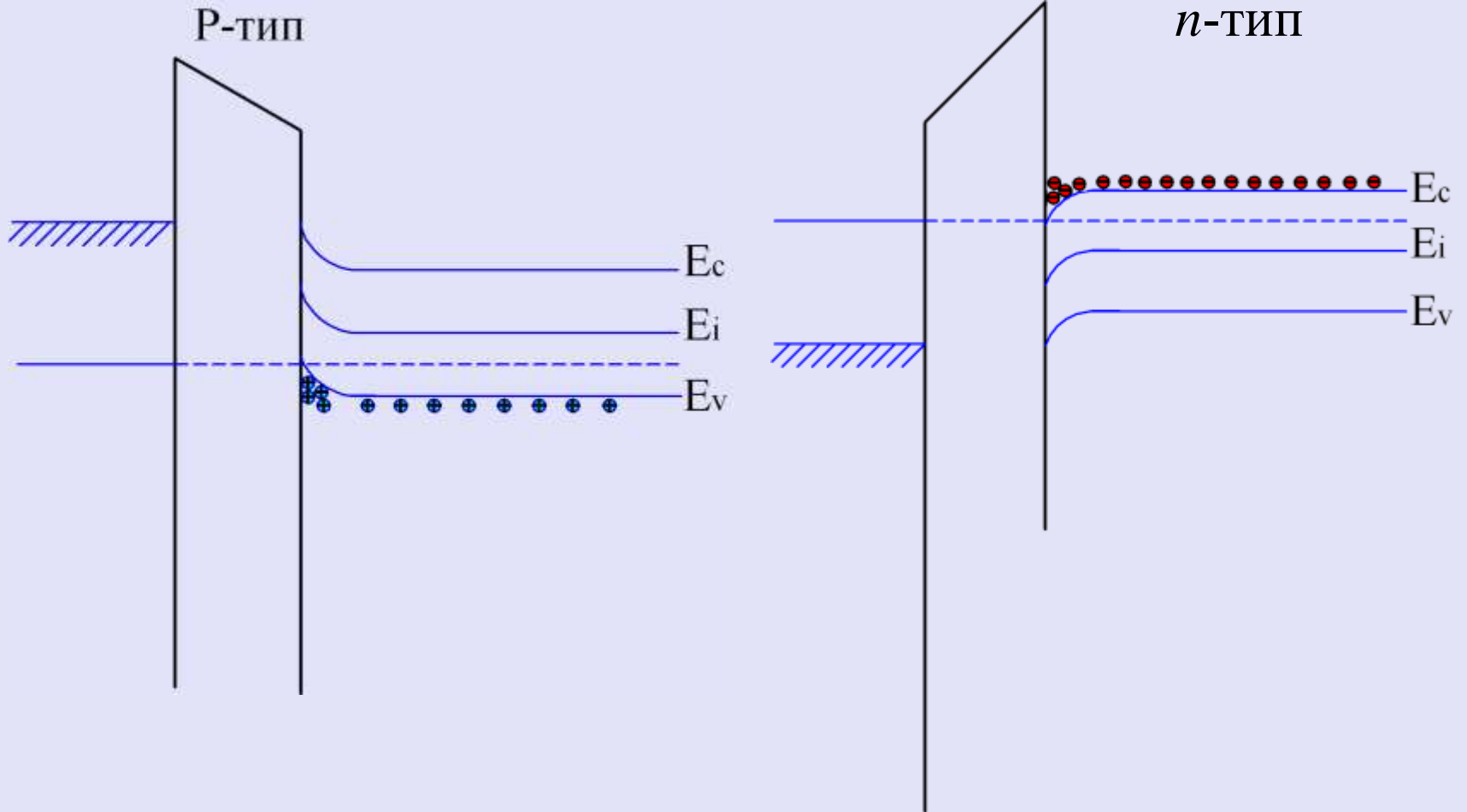
МДП-структура



На границе металл-диэлектрик, диэлектрик-полупроводник, а в отсутствие диэлектрика на границе металл-полупроводник возникает *контактная разность потенциалов*:

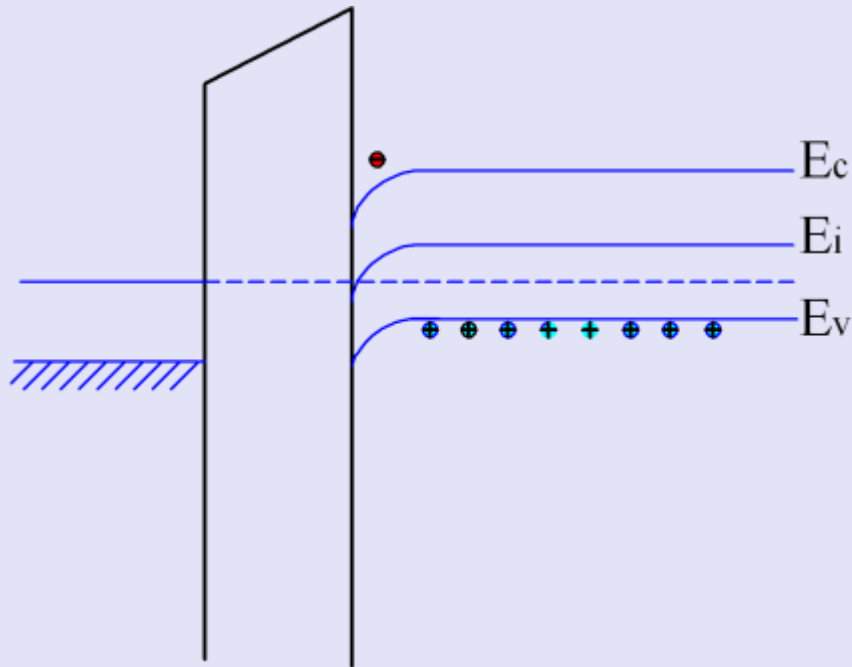
$$q\varphi_k = \Phi_1 - \Phi_2$$

Обогащение

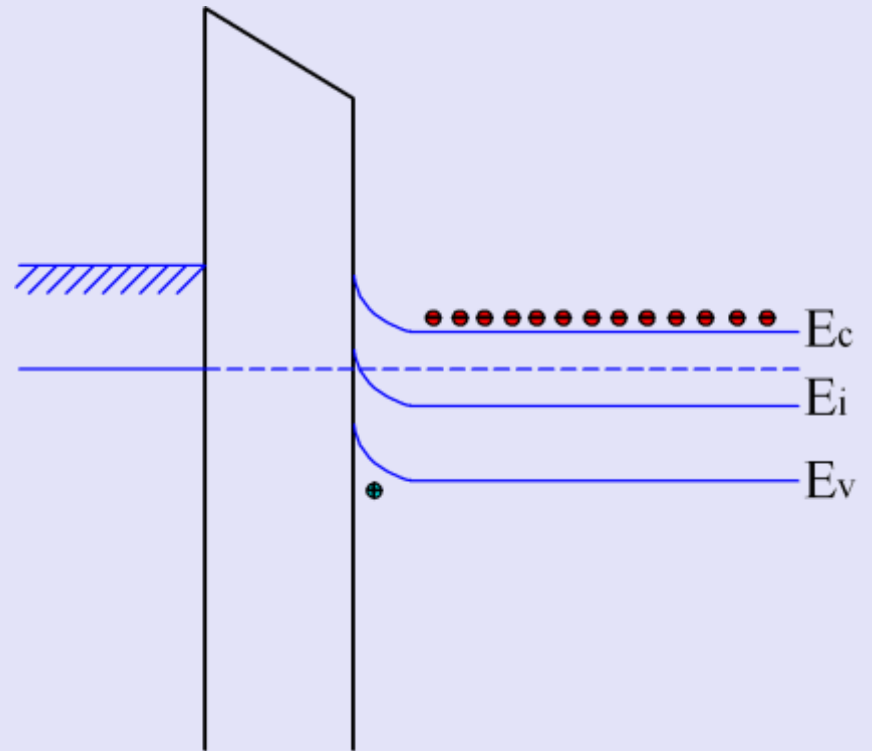


Обеднение

p-ТИП

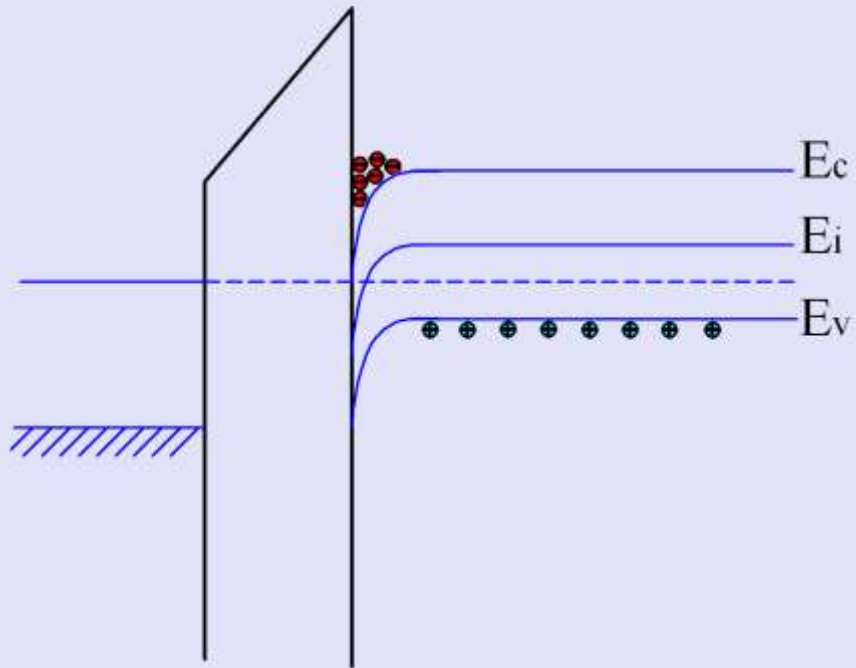


n-ТИП

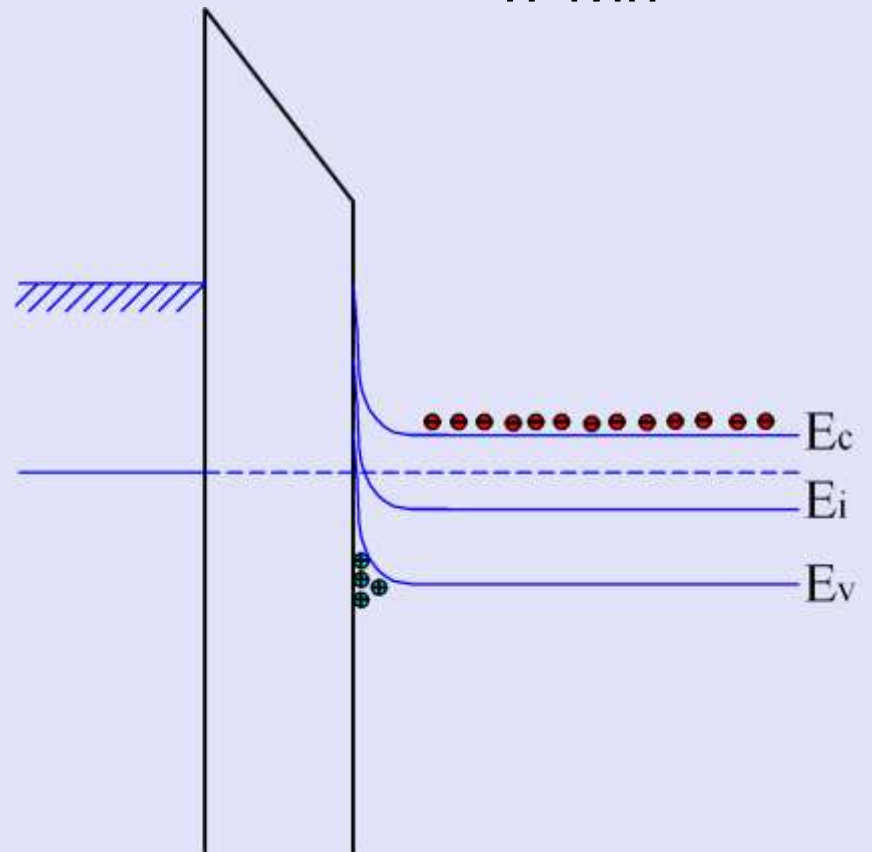


Инверсия

p-тип



n-тип



Допущения для «идеальной» МДП-структуры

- Разность работ выхода между металлом затвора и диэлектриком, диэлектриком и полупроводником, равна нулю.
- Диэлектрик является идеальным изолятором.
- В диэлектрике и на границах раздела металл-диэлектрик и полупроводник-диэлектрик нет никаких зарядов, т.е. диэлектрик не имеет дефектов.

При любых смещениях в структуре могут существовать только заряд в ее полупроводниковой части и равный ему заряд противоположного знака на металлическом электроде, отделенном от полупроводника слоем диэлектрика.

Расчет параметров МДП-структуры

Для n-типа:
$$\varphi_{ms} = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \varphi_B \right) = 0 \quad (10.8)$$

Для p-типа:
$$\varphi_{ms} = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \varphi_B \right) = 0, \quad (10.9)$$

где $q \cdot \phi_B = (F - E_i)$

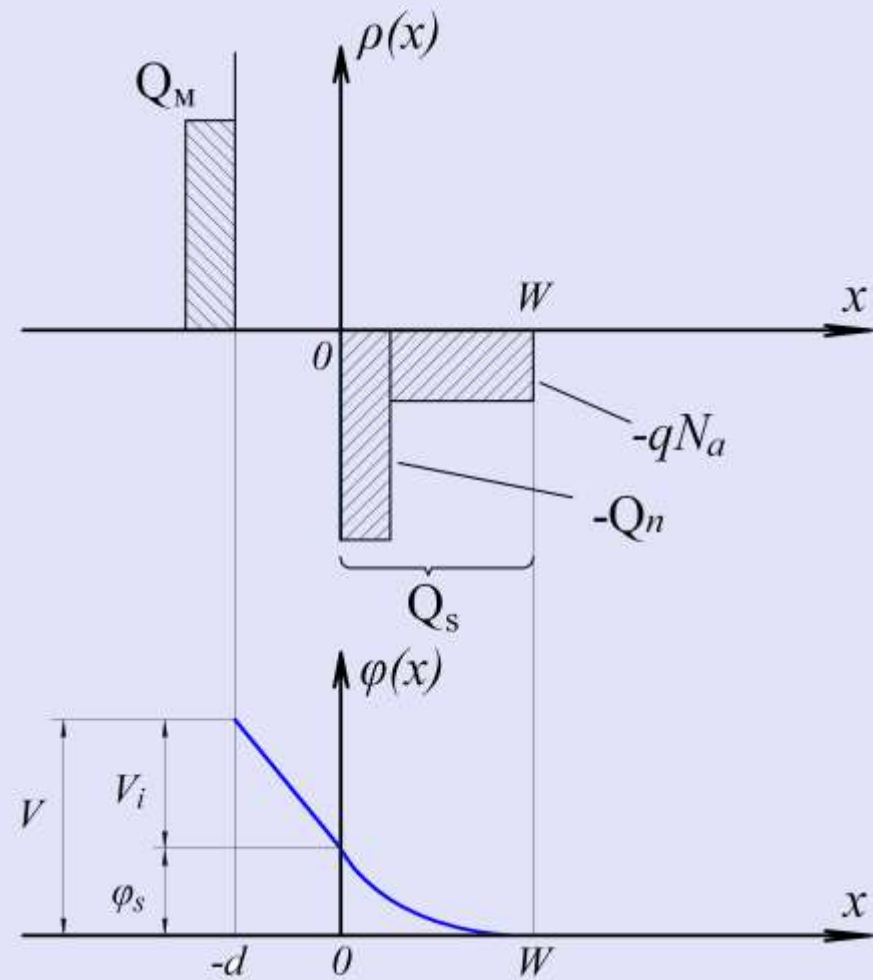
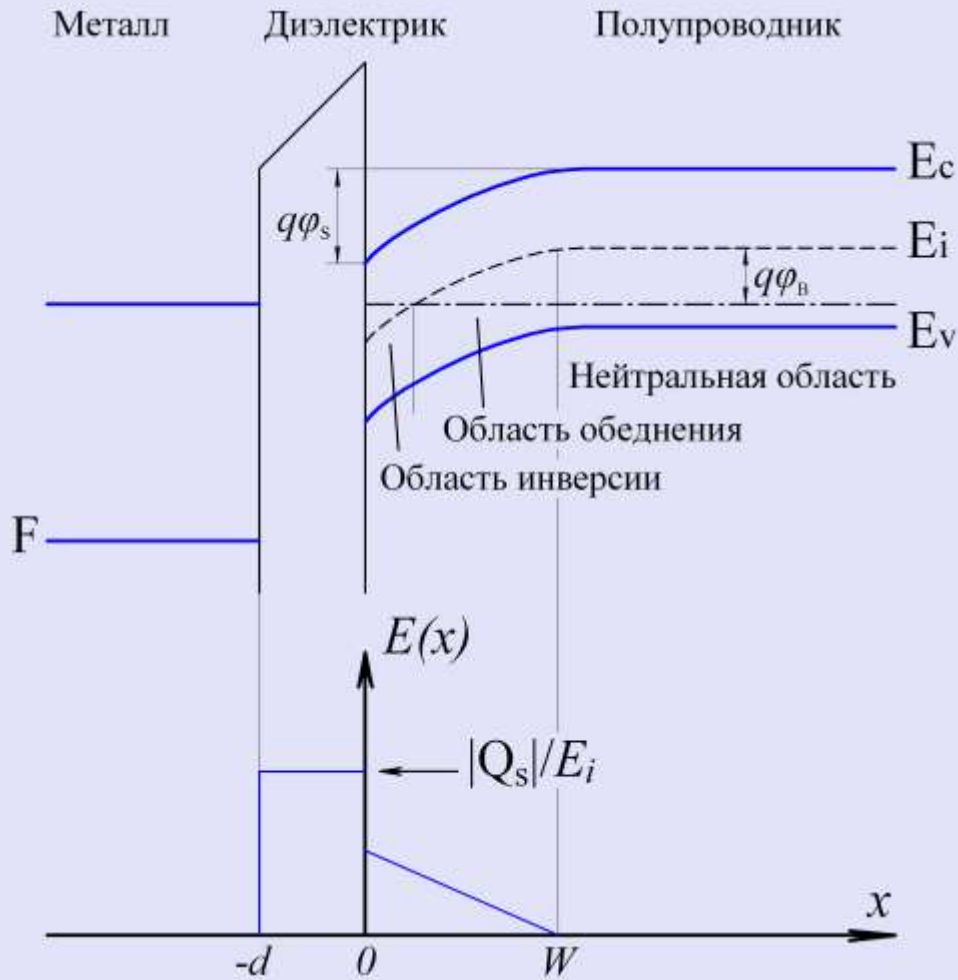
$$n(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{F - E_i}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_F - \phi_i)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (10.10)$$

$$p(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - F}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_i - \phi_F)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (10.11)$$

Для n-типа:
$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (10.12)$$

Для p-типа:
$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (10.13)$$

МДП-структура



Для характеристики изгиба будем использовать понятие *поверхностного потенциала* ϕ_s

$$\frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2} = -\frac{\partial \mathbf{E}(x)}{\partial x} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = \frac{q \cdot N_a^-}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

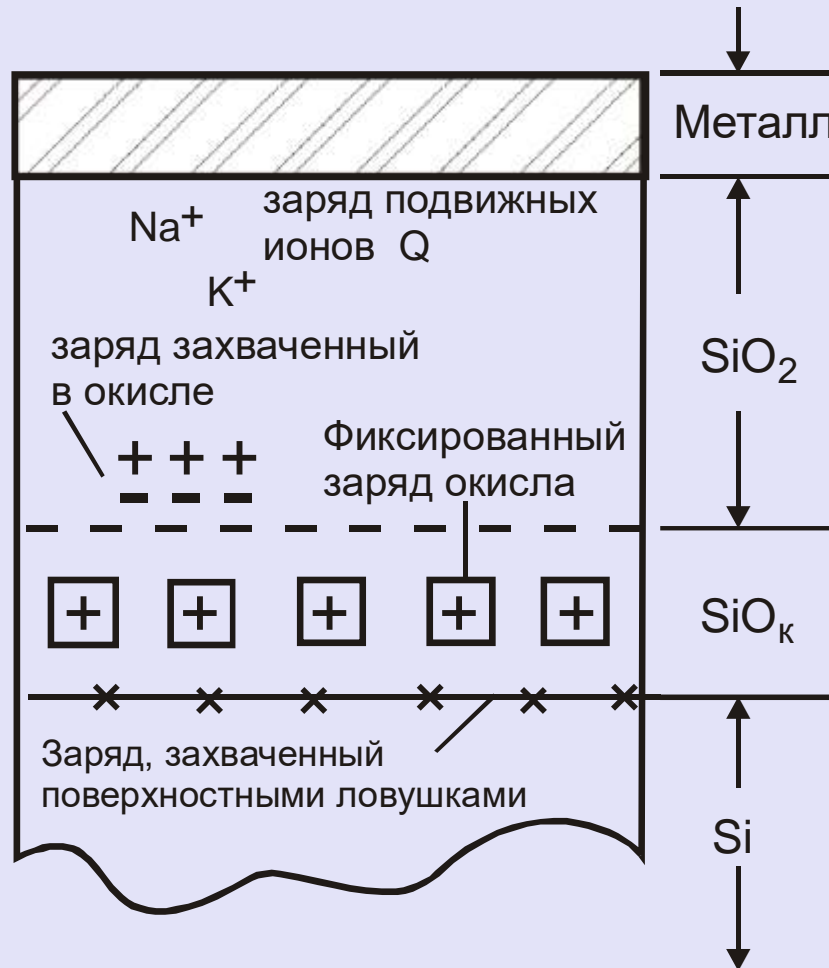
$$\phi = 0 \quad \frac{d\phi}{dx} = 0 \quad \text{при } x = w$$

$$\phi = \frac{q \cdot N_a^-}{2\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0} (x - w)^2 \quad \phi_s = \frac{q \cdot N_a^- \cdot w^2}{2\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0}$$

Пороговое напряжение: $U_{пор} = \varphi_{S0} + (Q_{нов} + Q_{ОПЗ}) / C_{ox}$

$$\varphi_{S0} = 2\varphi_B = 2\varphi_T \ln\left(N_a^- / n_i\right)$$

Заряды в окисле



К расчету МДП-структуры

$$n(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{F - E_i}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_F - \phi_i)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (4.6)$$

$$p(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - F}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_i - \phi_F)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (4.7)$$

где $\phi_F = F/q$ – потенциал уровня Ферми, $\phi_i = E_i/q$ – потенциал собственного полупроводника

Для р-типа:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (4.8)$$

Для n-типа:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (4.9)$$

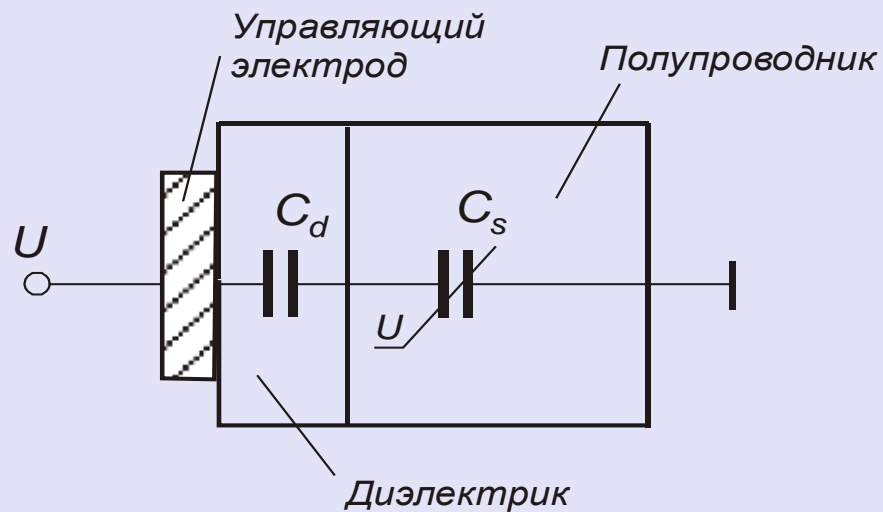
В приповерхностной области:

$$p_p(x) = p_{p0} \cdot \exp\left(-\frac{\phi(x)}{\phi_T}\right) \quad (4.10)$$

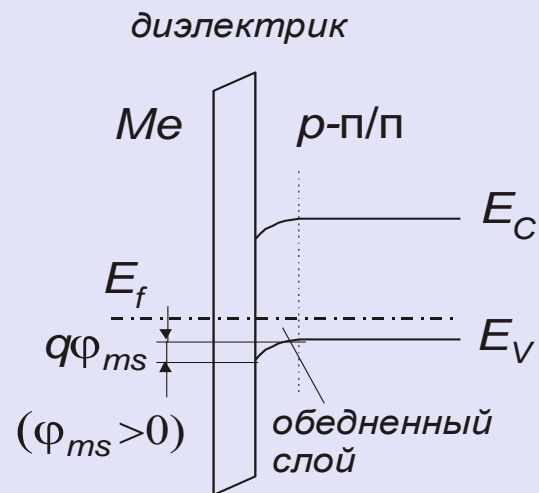
$$n_p(x) = n_{p0} \cdot \exp\left(\frac{\phi(x)}{\phi_T}\right) \quad (4.11)$$

$$\text{Ширина ОПЗ} - w = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s \cdot \phi_s}{q \cdot N_a^-}} \quad (4.12)$$

Емкость МДП-структуры



а)



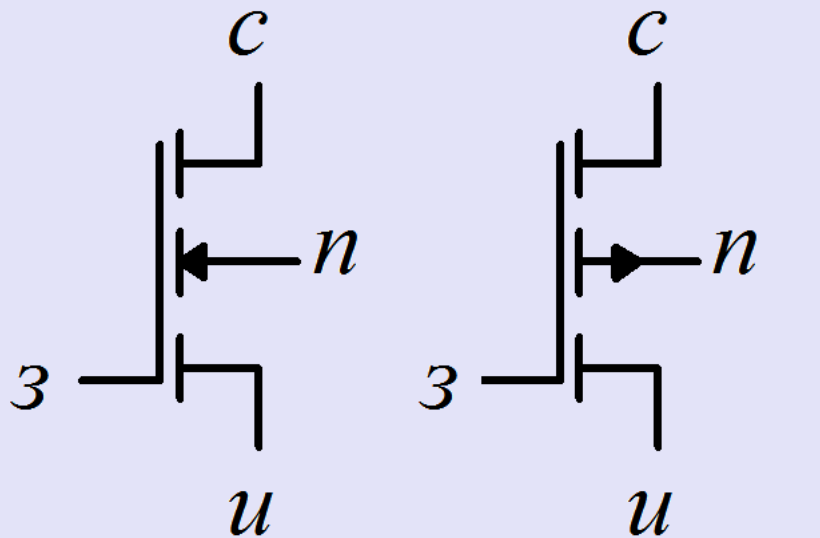
б)

МДП-транзистор

МДП-транзистор называют также *транзистором с изолированным затвором*, так как в отличие от ПТУП затвор от полупроводника изолирован окислом.

Условные обозначения МДП-транзисторов

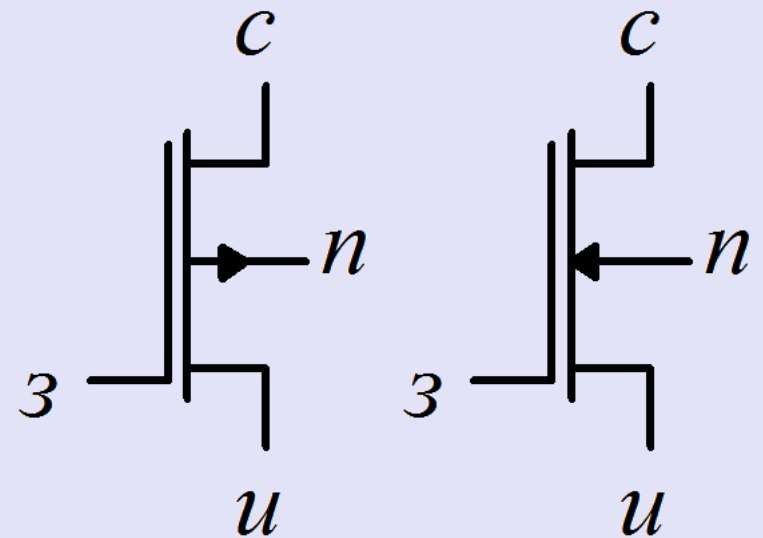
С индуцированным каналом



n-канальный

p-канальный

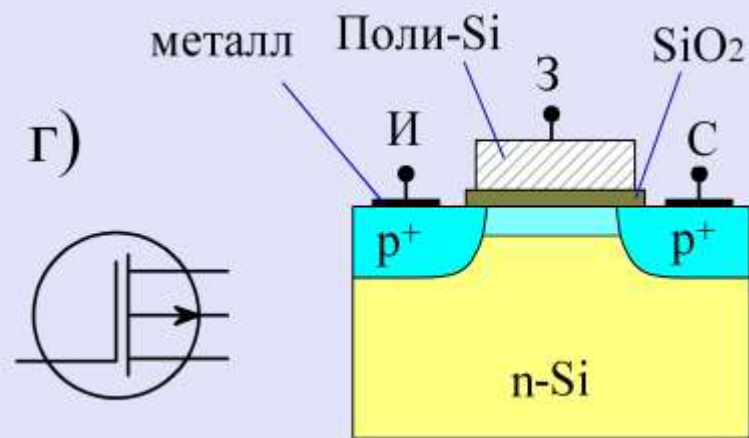
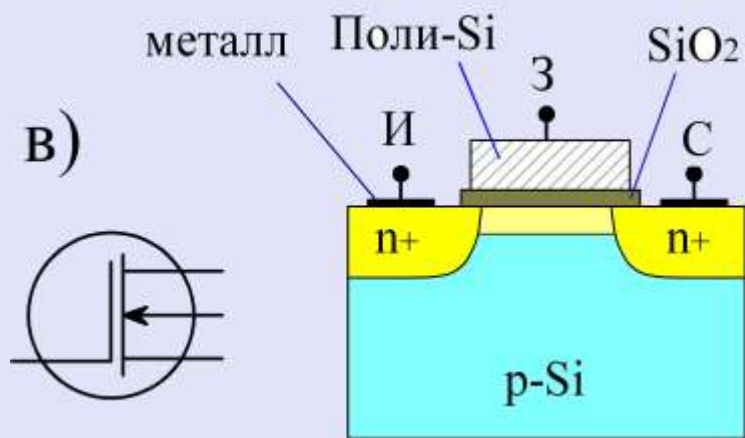
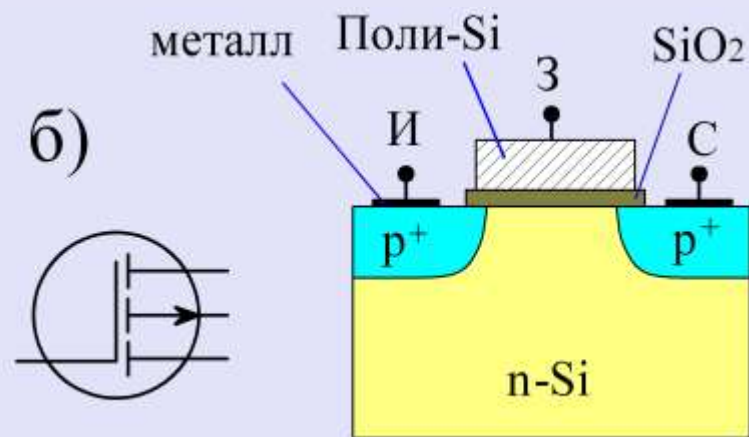
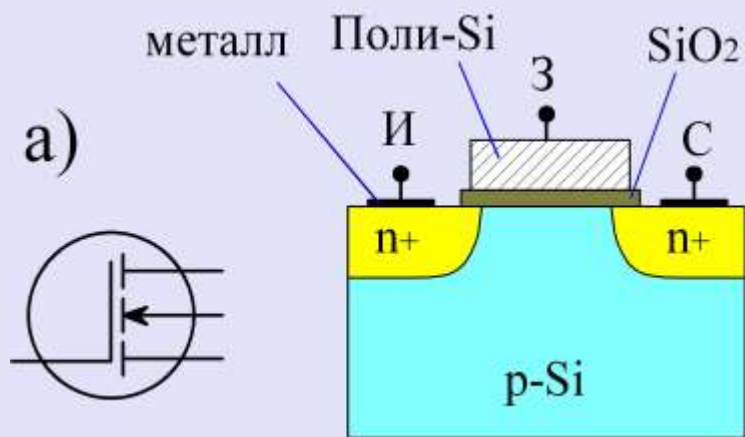
Со встроенным каналом



p-канальный

n-канальный

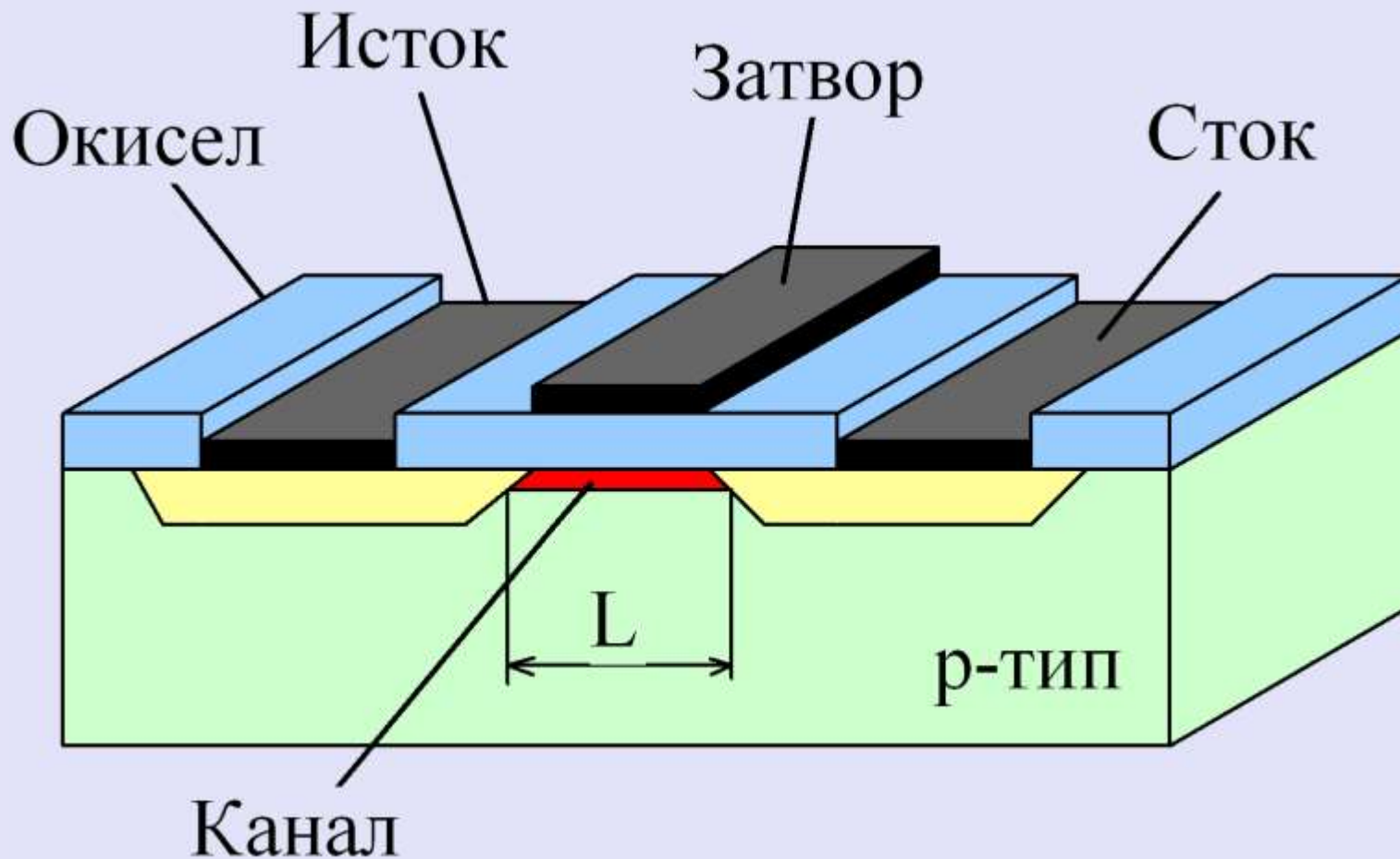
Структуры и обозначения МДП-транзисторов



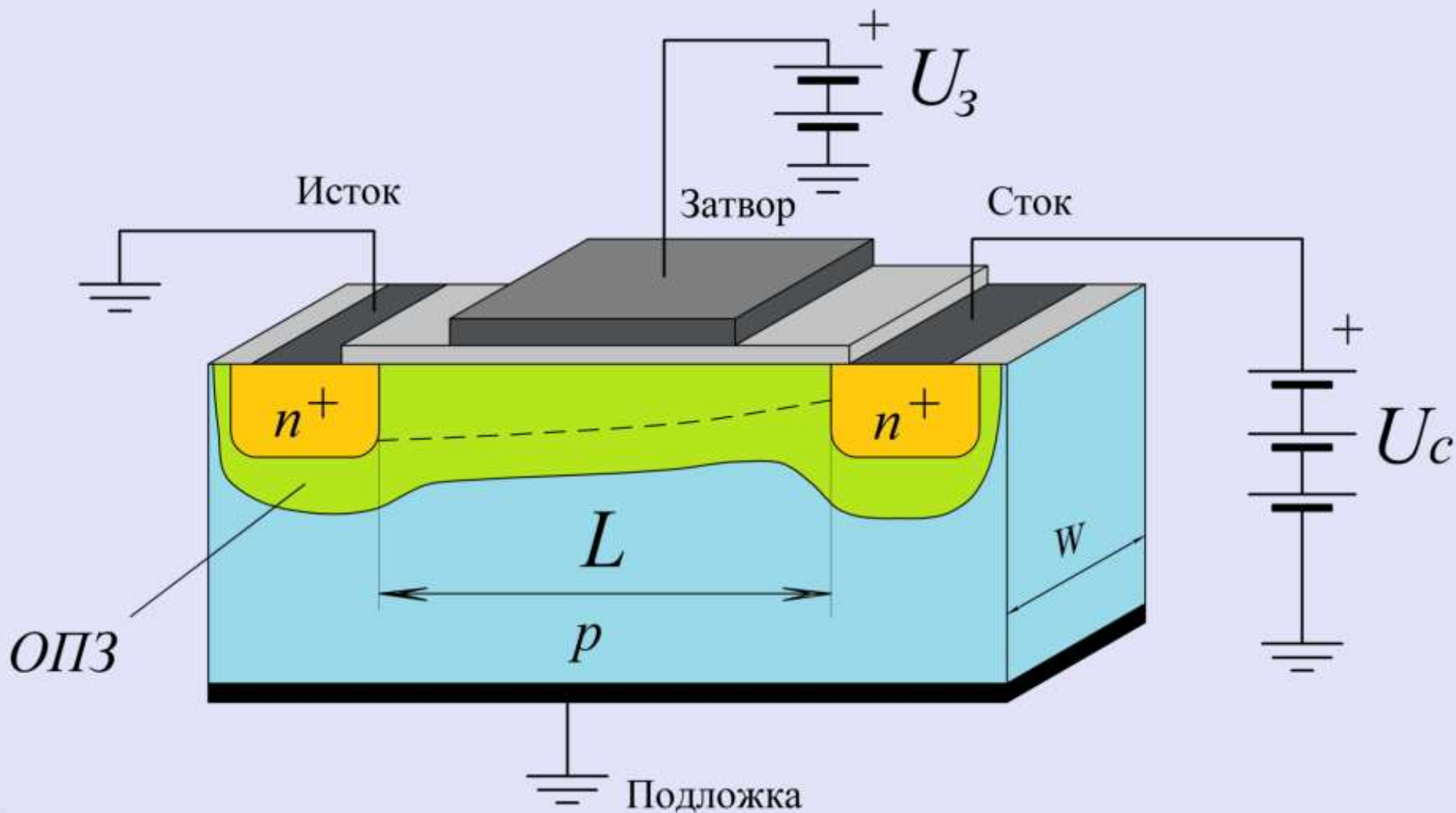
а, б – с индуцированным каналом

в, г – со встроенным каналом

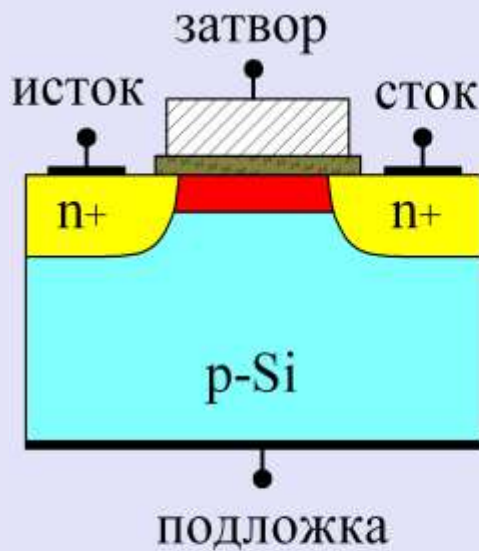
МДП-транзистор со встроенным каналом



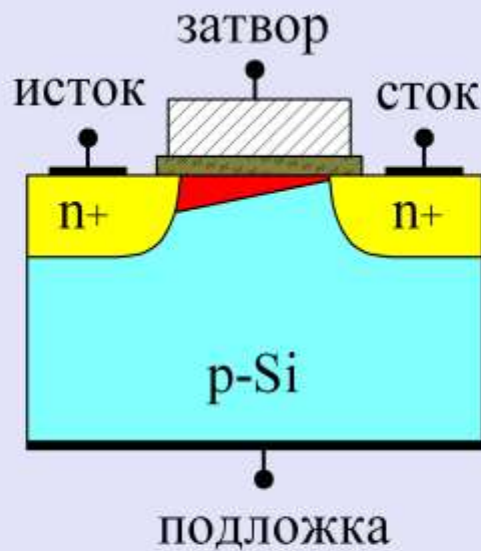
МДП-транзистор с индуцированным n -каналом



Заккрытие встроенного канала

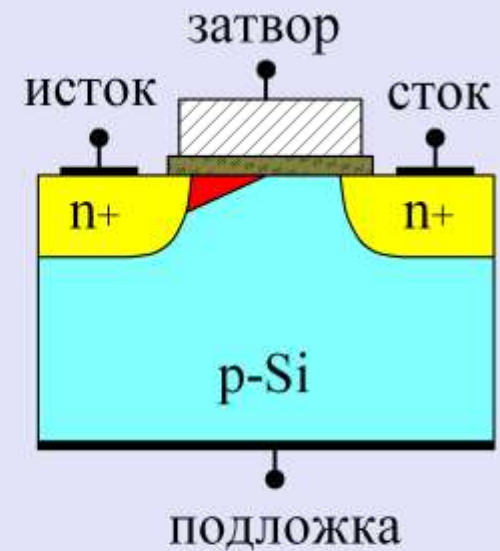


$$U_{си} = 0$$



$$U_{си} > 0$$

$$U_{зи} > U_{пор}$$



$$U_{си} > U_{нас}$$

Сделаем следующие основные допущения:

- одномерное приближение, т.е. концентрации носителей и потенциалы по сечению канала постоянны;
- на поверхности выполняется условие сильной инверсии ($U_{зи} > U_{пор}$);
- заряд на поверхностных состояниях постоянен и не зависит от изгиба зон;
- дрейфовые токи значительно больше диффузионных токов и последними можно пренебречь;
- подвижность носителей заряда в канале постоянна.

Расчет характеристик МДП-транзистора

Плотность тока в канале: $j_c = \sigma_c \cdot E(x)$ (10.14)

где $\sigma_c = q \cdot \mu_s \cdot n_{инд} = \mu_s \cdot Q_{инд}$

$$Q_{инд} = C_3 \cdot [U_3 - U_{пор} - U(x)] \quad (10.15)$$

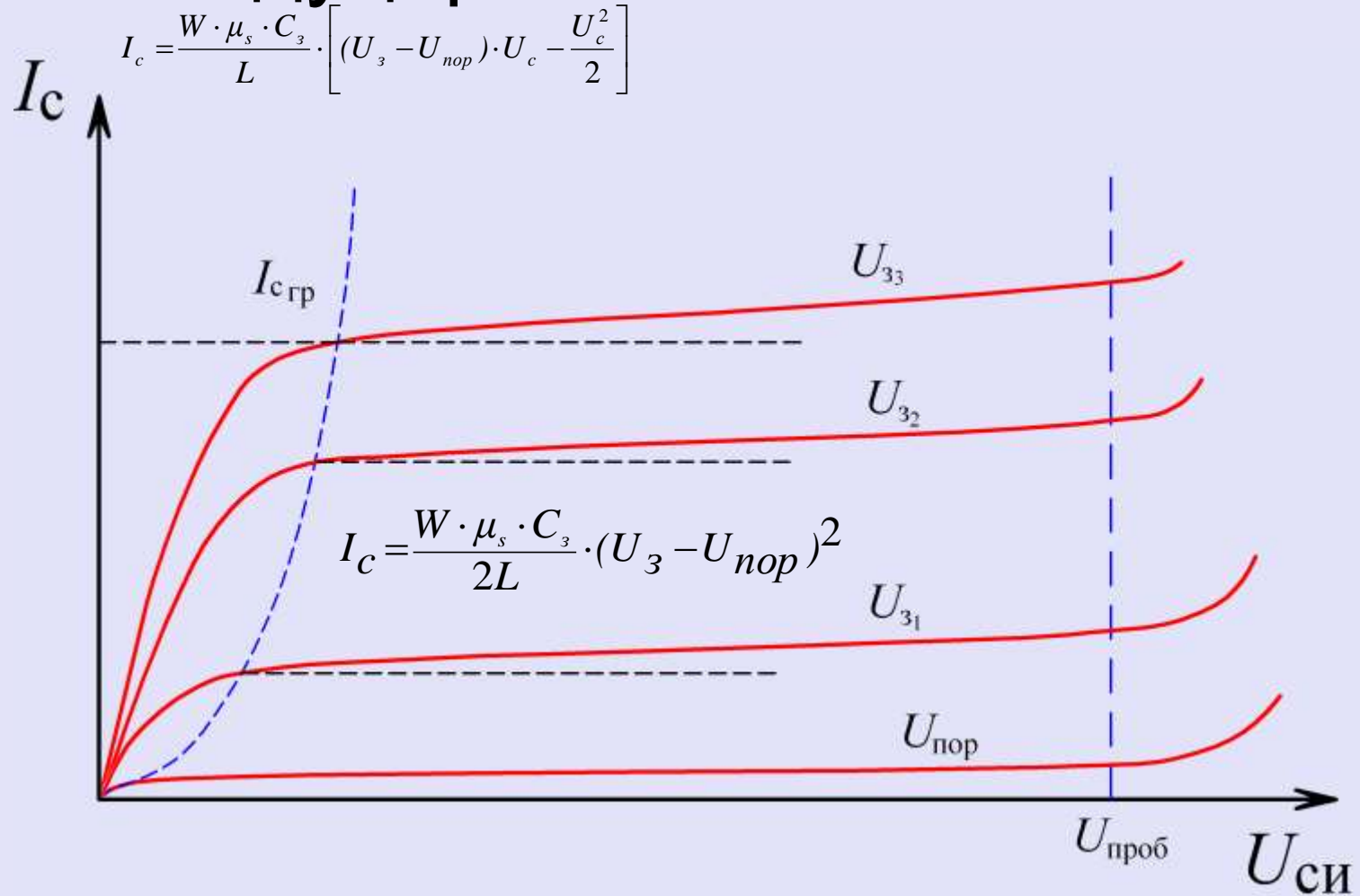
$$\sigma_c = \mu_s \cdot C_3 \cdot [U_3 - U_{пор} - U(x)] \quad (10.16)$$

Ток стока в линейной области: $I_c = \frac{W \cdot \mu_s \cdot C_3}{L} \cdot \left[(U_3 - U_{пор}) \cdot U_c - \frac{U_c^2}{2} \right]$ (10.17)

Ток стока в пологой области: $I_c = \frac{W \cdot \mu_s \cdot C_3}{2L} \cdot (U_3 - U_{пор})^2$ (10.18)

Крутизна: $\delta = \frac{dI_c}{dU_3} = \frac{W \cdot \mu_n \cdot C_d}{L} \cdot (U_3 - U_{пор})$ (10.19)

Выходная ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом



три основные рабочие области на выходной характеристике МДП-транзистора

- 1 – область отсечки выходного тока: *транзистор заперт* ($U_{зи} < U_{пор}$), в цепи протекает малый обратный ток, обусловленный утечкой и обратным током стокового *pn*-перехода.
- 2 – активная область (пологая часть выходных ВАХ $U_з > U_{пор}$, $U_{си} > U_{си_гр}$) – область, где ток I_c остается практически неизменным с ростом напряжений $U_{си}$.
- 3 – область открытого состояния (крутая часть ВАХ): ток I_c в этой области задается внешней цепью.
 - С увеличением напряжения на затворе, граница, разделяющая крутую и пологую области, сдвигается в область больших напряжений сток-исток.

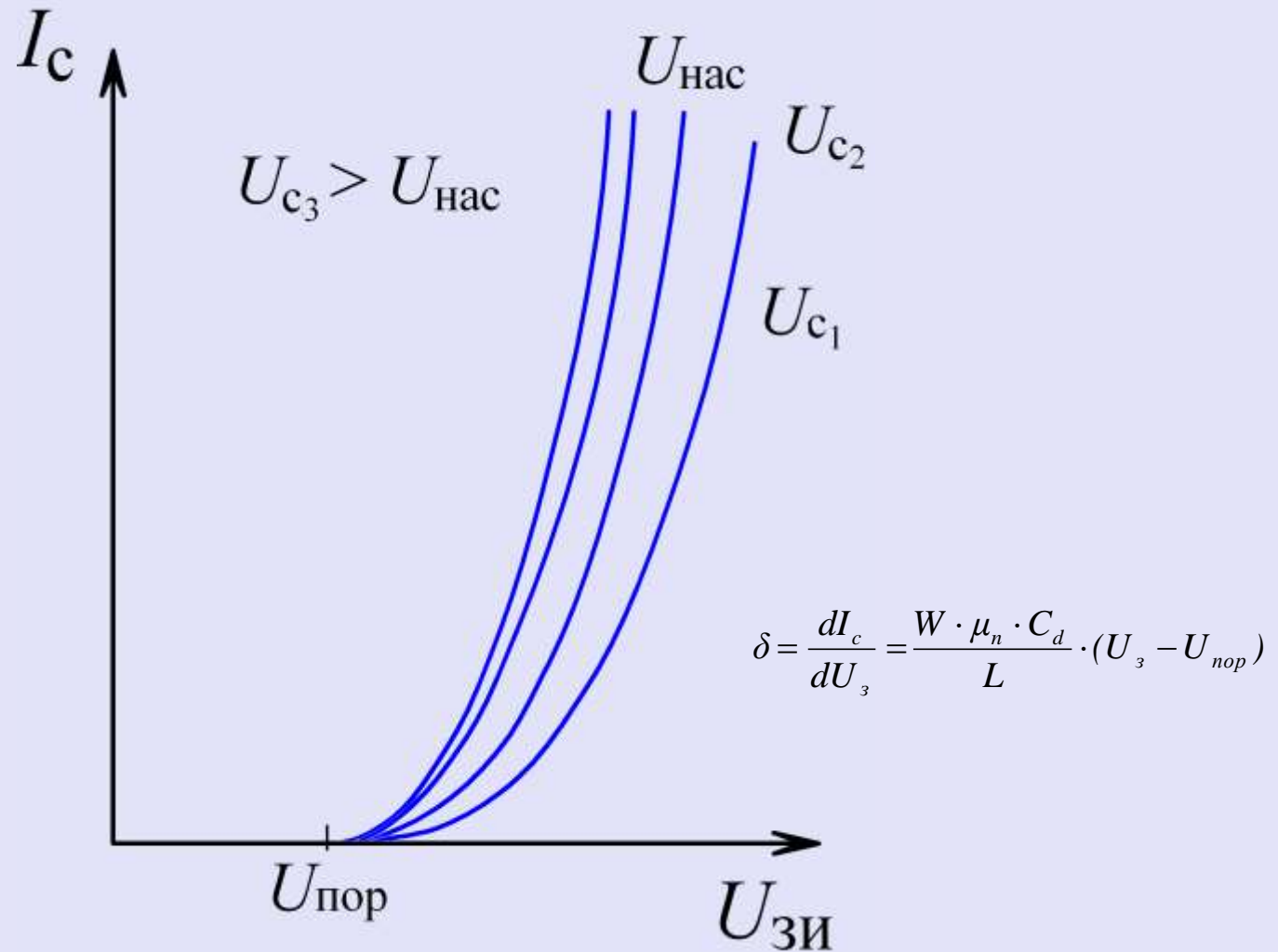
В области **1** МДП-транзистор, как и биполярный, работающий в ключевом режиме, заперт.

В области **3** транзистор открыт.

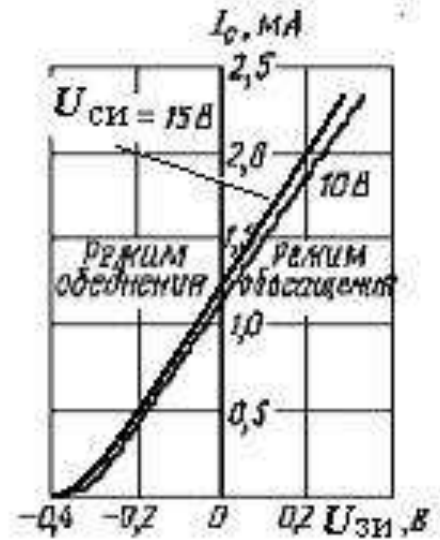
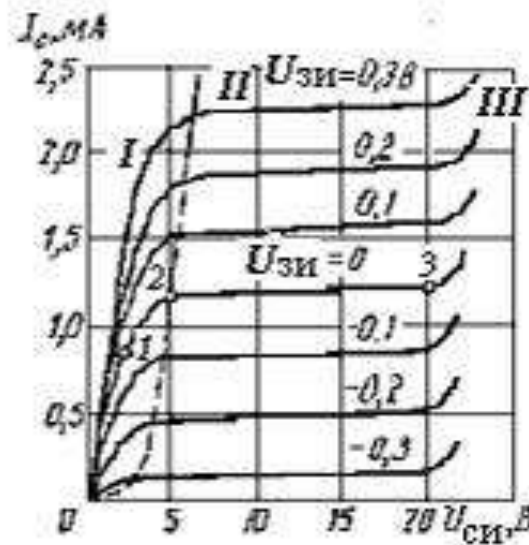
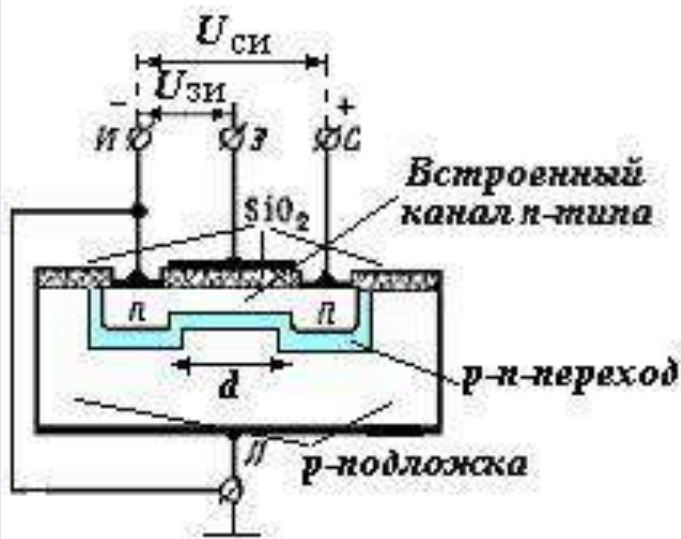
В активной области **2** МДП-транзистор работает в усилительном режиме.

В области **4** наступают предпробойные явления, сопровождающиеся резким увеличением тока I_c . Область пробоя определяет выбор предельно допустимых напряжений.

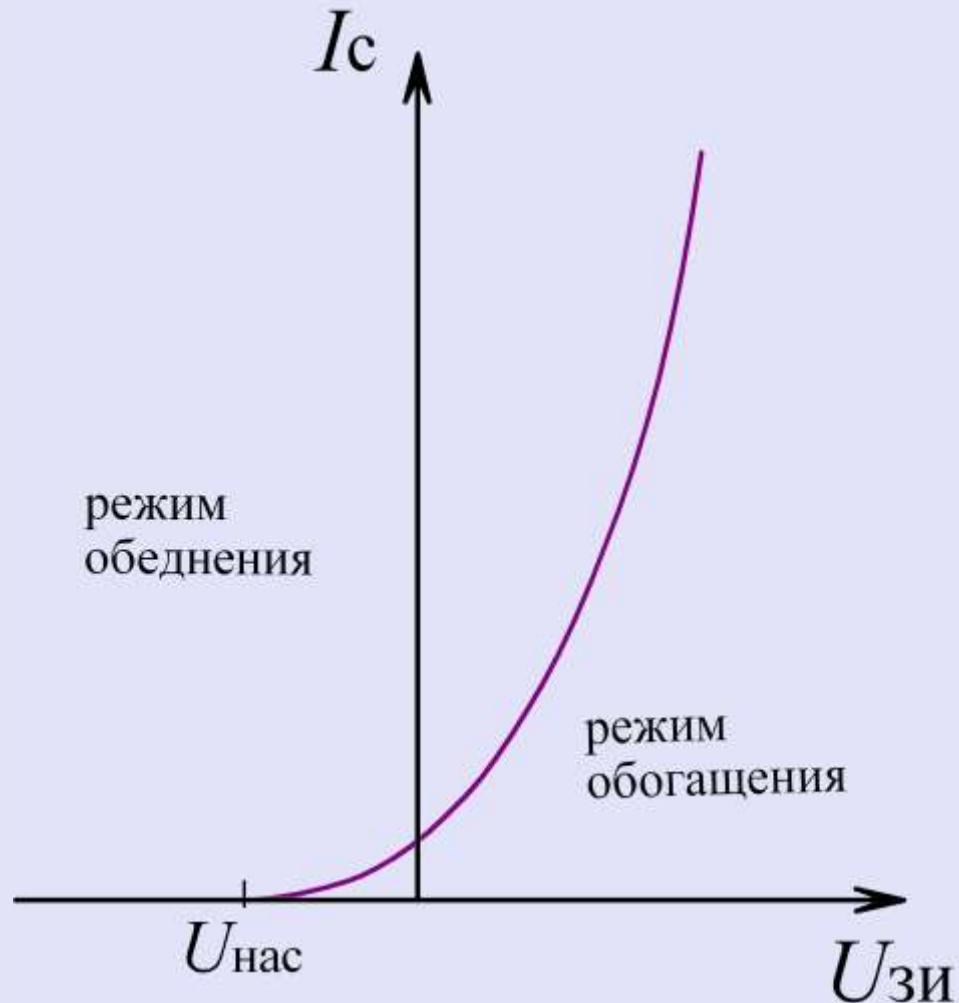
Передаточная х-ка МДП-транзистора с индуцированным каналом



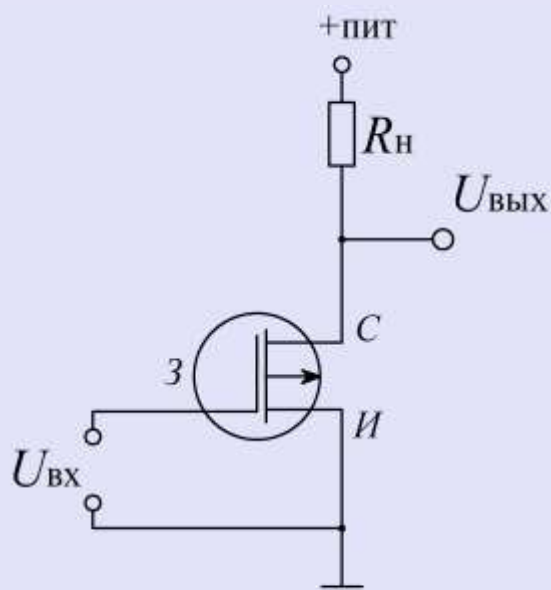
МДП-ТРАНЗИСТОР СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ



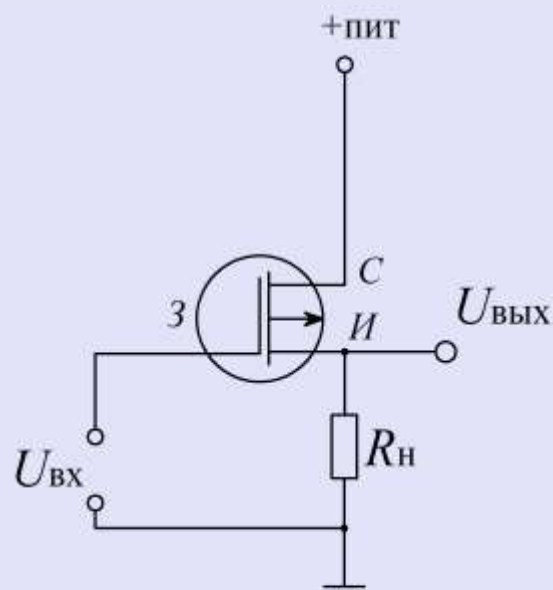
Передаточная х-ка МДП-транзистора со встроенным каналом



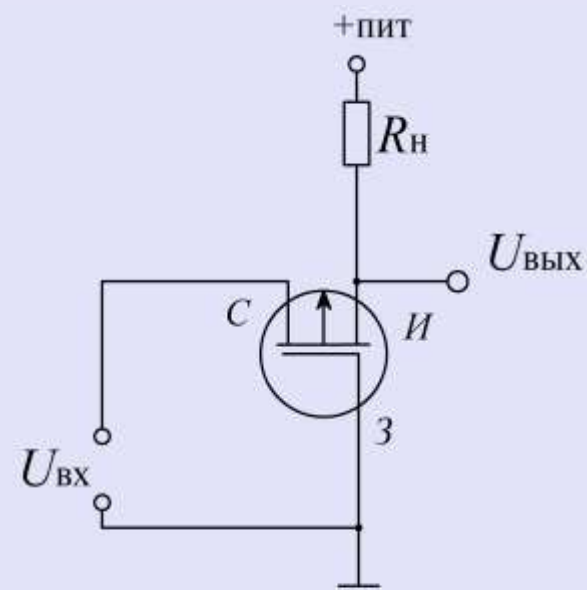
Варианты включения полевого транзистора



а) ОБЩИЙ ИСТОК



б) ОБЩИЙ СТОК



в) ОБЩИЙ ЗАТВОР

Преимущества МДП-транзисторов по сравнению с биполярными

- Высокое входное сопротивление, которое определяется только сопротивлением утечки диэлектрика и достигает $10^{12} - 10^{15}$ Ом по постоянному току.
- Низкий уровень шумов, что объясняется малым вкладом рекомбинационных процессов, так как в переносе тока в полевых транзисторах в отличие от биполярных участвуют только основные носители.
- Относительная простота изготовления.

Полевые транзисторы



До 70-х годов XX века в качестве силовых полупроводниковых приборов, помимо тиристора, использовались биполярные транзисторы. Их эффективность была ограничена несколькими недостатками:

- необходимость большого тока базы для включения;
- наличие токового «хвоста» при запираии, поскольку ток коллектора не спадает мгновенно после снятия тока управления – появляется сопротивление в цепи коллектора, и транзистор нагревается;
- зависимость параметров от температуры;
- напряжения насыщения цепи коллектор-эмиттер ограничивает минимальное рабочее напряжение.

С появлением полевых транзисторов в 80-х годах, выполненных по технологии МОП, ситуация изменилась. В отличие от биполярных, полевые транзисторы:

- управляются не током, а напряжением;
- их параметры не так сильно зависят от температуры;
- имеют низкое сопротивление канала (менее миллиома);
- могут работать в широком диапазоне токов (от миллиампер до сотен ампер);
- имеют высокую частоту переключения (сотни килогерц и больше);
- высокие рабочие напряжения при больших линейных и нагрузочных изменениях, тяжёлых рабочих циклах и низких выходных мощностях.

Первые мощные полевые транзисторы были созданы в СССР в НИИ «Пульсар» (разработчик – В. В. Бачурин) в 1973 г., а их ключевые свойства исследованы в Смоленском филиале МЭИ (научный руководитель – В. П. Дьяконов).

В рамках этих работ в 1979 году были предложены составные транзисторы с управлением мощным биполярным транзистором с помощью полевого транзистора с изолированным затвором. Было показано, что выходные токи и напряжения составных структур определяются биполярным транзистором, а входные – полевым.

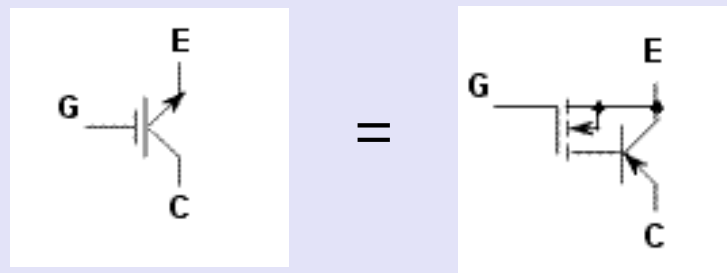
Западные исследователи разработали подобный прибор в 1979 году, он получил название IGBT и, на сегодняшний день, это название широко распространено во всём мире.

В настоящее время существует несколько базовых структур силовых МОП ПТ. В области коммутируемых токов до 50 А и напряжений до 500 В основными приборами силовой электроники являются биполярные транзисторы (ВРТ) и идущие им на смену полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП ПТ, MOSFET-*Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor*).

Нишу высоковольтных силовых приборов с большими уровнями токов и напряжениями до единиц киловольт заняли биполярные транзисторы с изолированным затвором ([англ. IGBT](#) от [англ. Insulated-gate bipolar transistor](#)).

По своей внутренней структуре БТИЗ представляет собой каскадное включение двух электронных ключей: входной ключ на [полевом транзисторе](#) управляет мощным оконечным ключом на биполярном транзисторе.

Схематичное изображение внутренней структуры БТИЗ



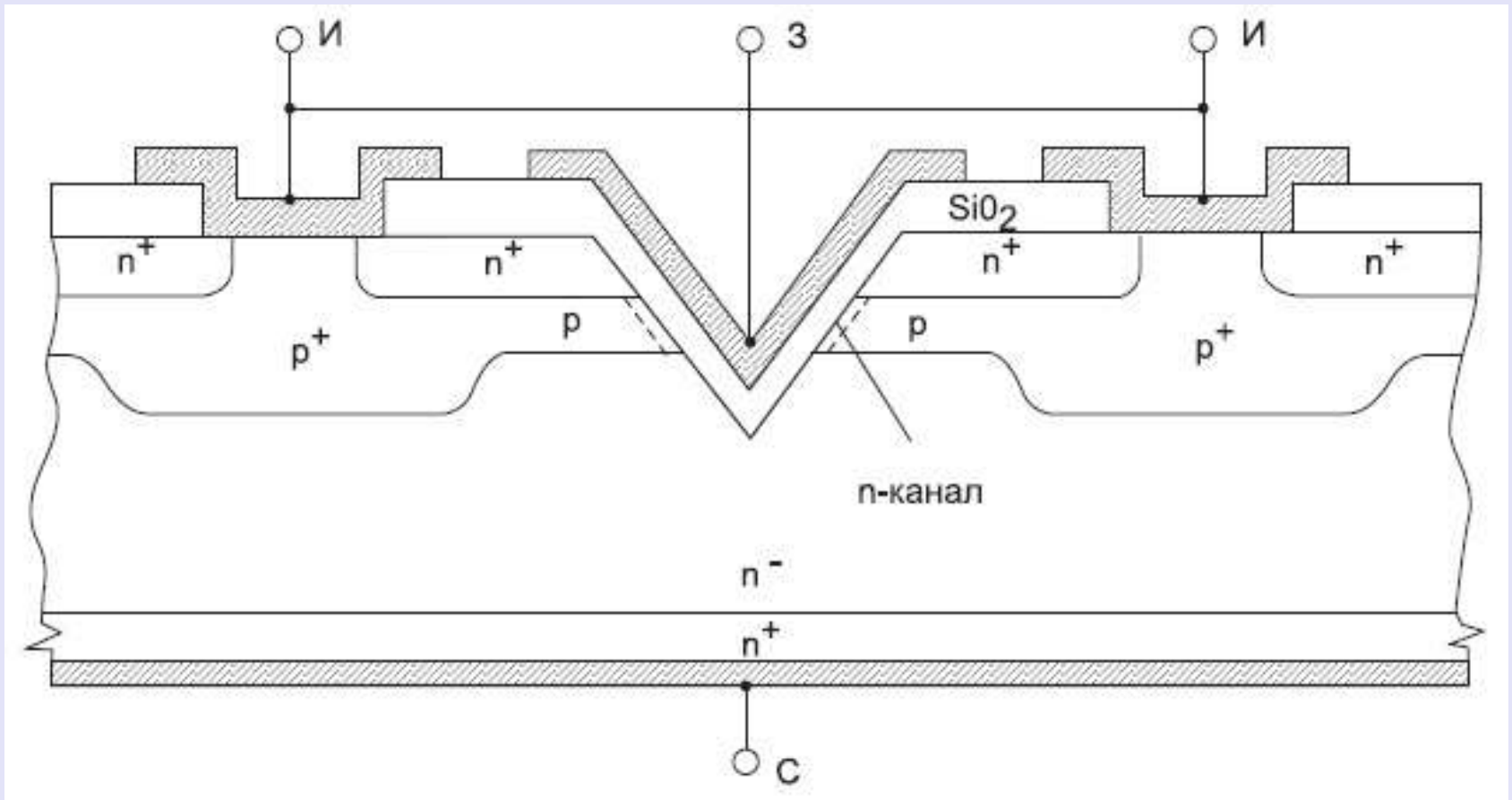
Управляющий электрод называется затвором, как у полевого транзистора, два других электрода – эмиттером и коллектором, как у биполярного. Прибор введён в силовую цепь выводами биполярного транзистора E (эмиттер) и C (коллектор), а в цепь управления – выводом G (затвор).

Такое составное включение ПТ и БТ позволяет сочетать в одном устройстве достоинства обоих типов полупроводниковых приборов. БТИЗ сочетает **достоинства** двух основных видов транзисторов: высокое входное сопротивление, низкий уровень управляющей мощности – от [полевых транзисторов](#) с изолированным затвором низкое значение остаточного напряжения во включенном состоянии – от [биполярных транзисторов](#).

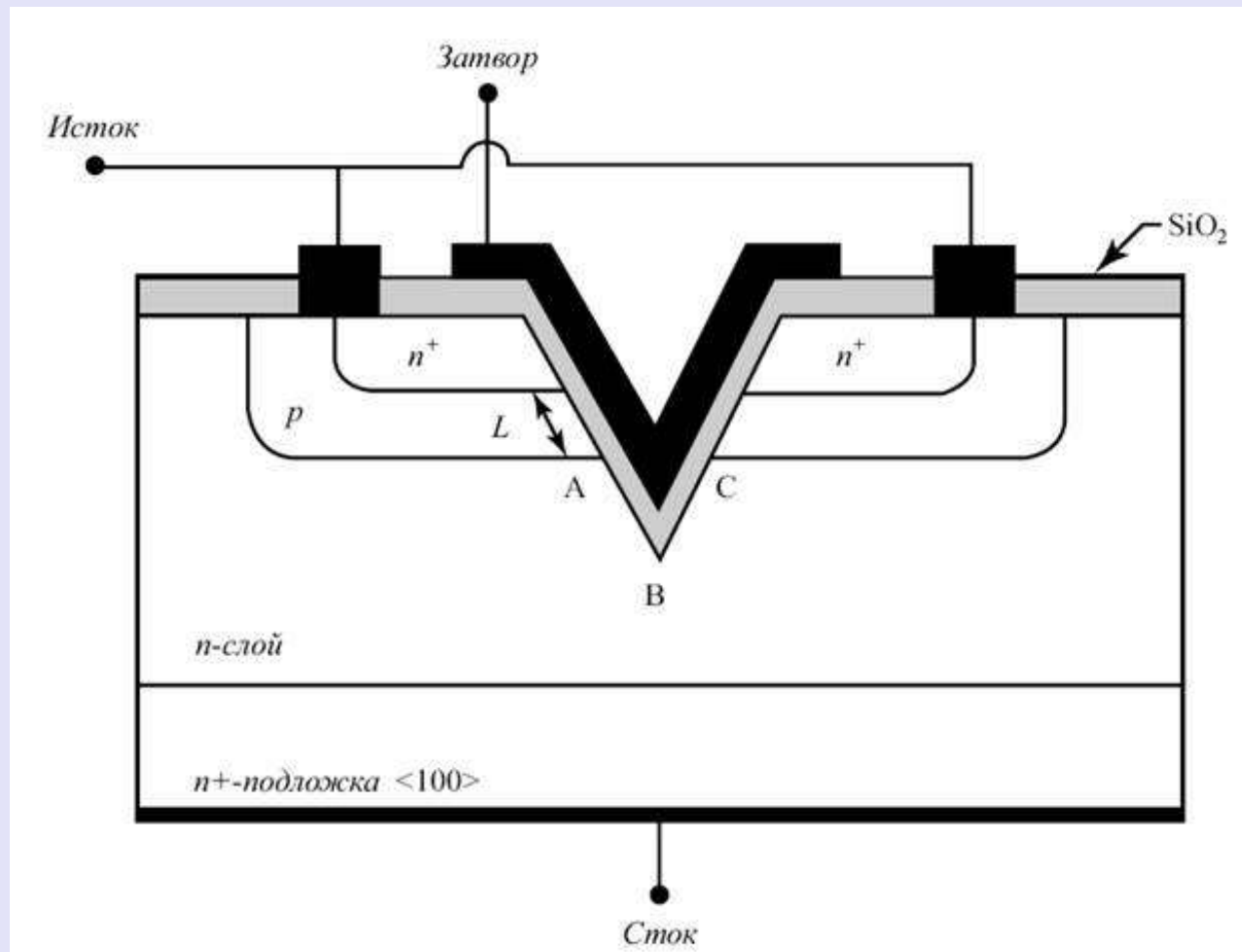
Горизонтальная структура первых советских мощных МДП-транзисторов



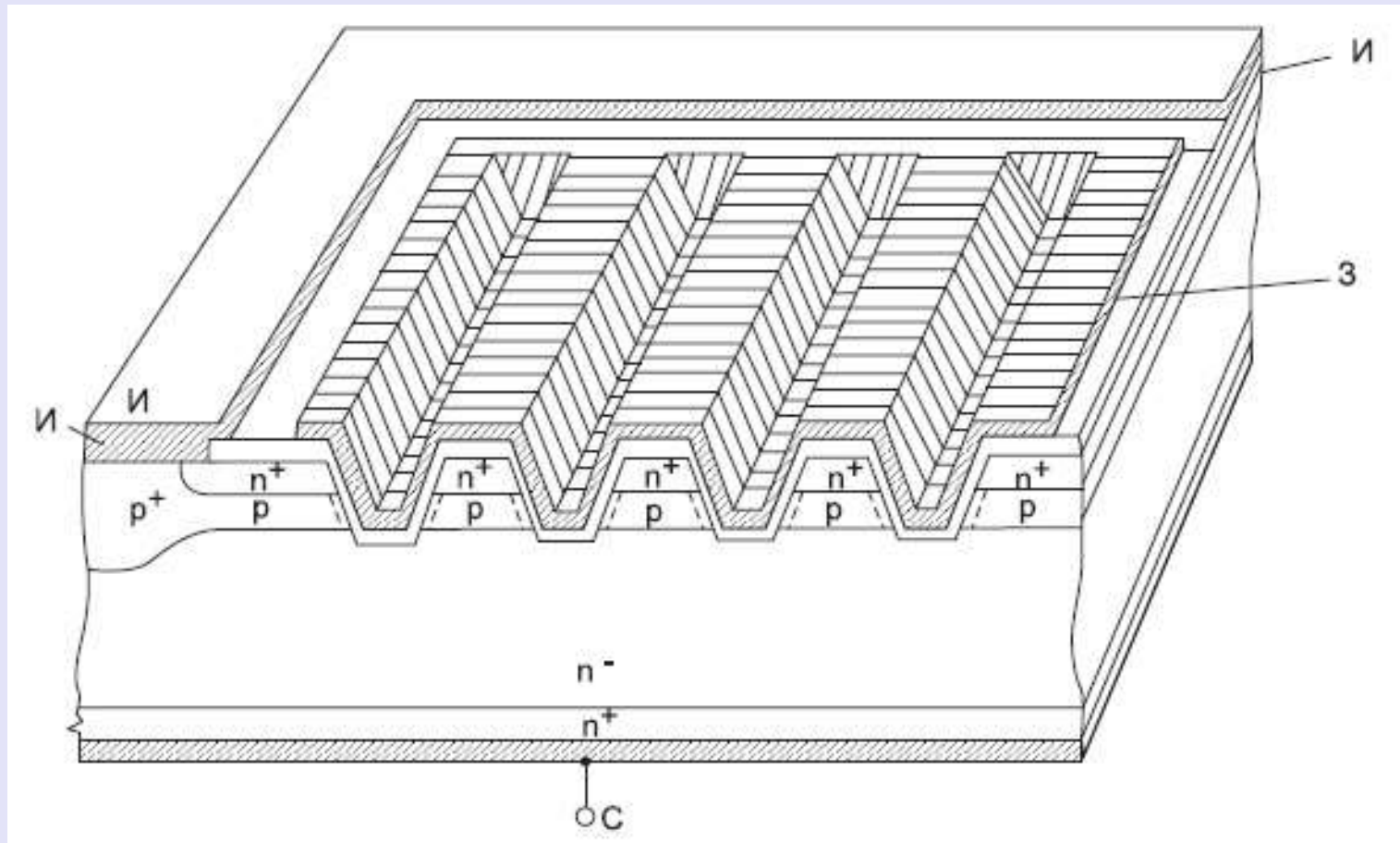
МДП- транзистор с V-образной структурой



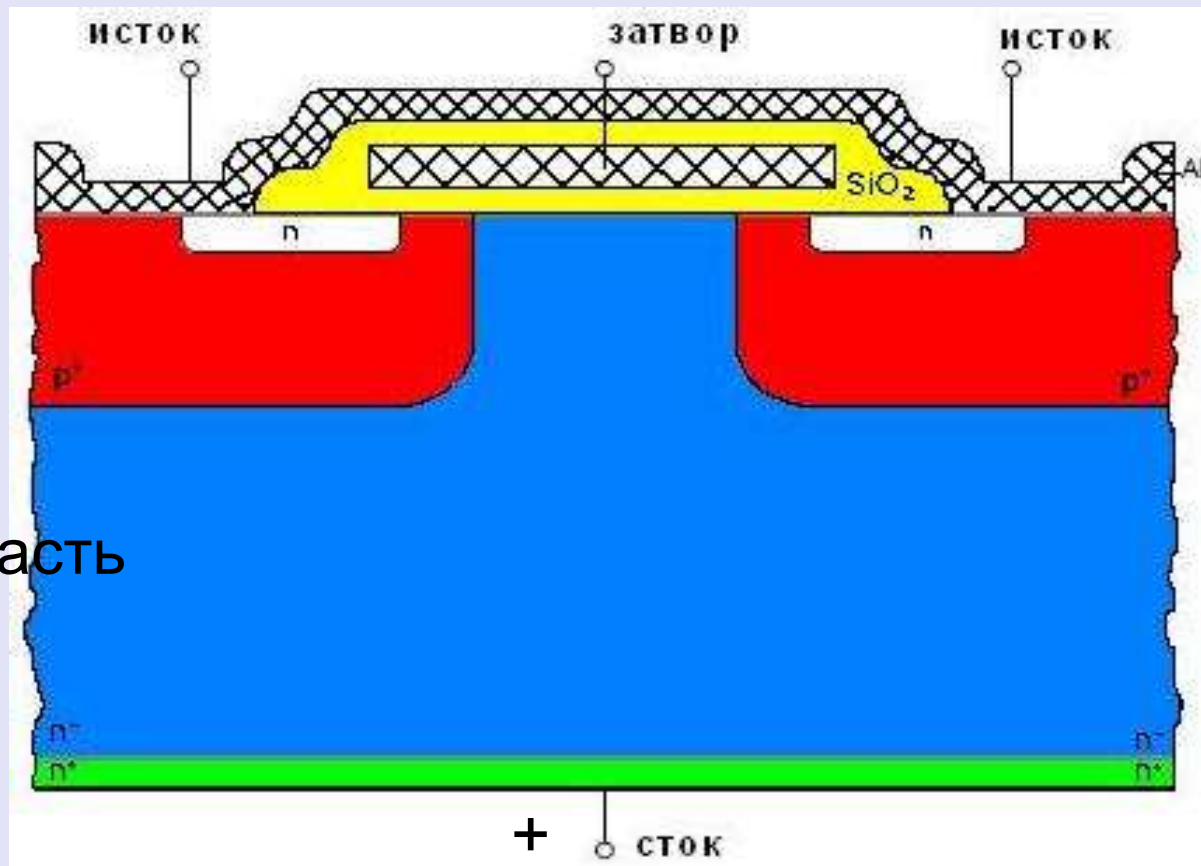
Структура V-MOP



МДП- транзистор с U -образной структурой



Структура D-МОП



База

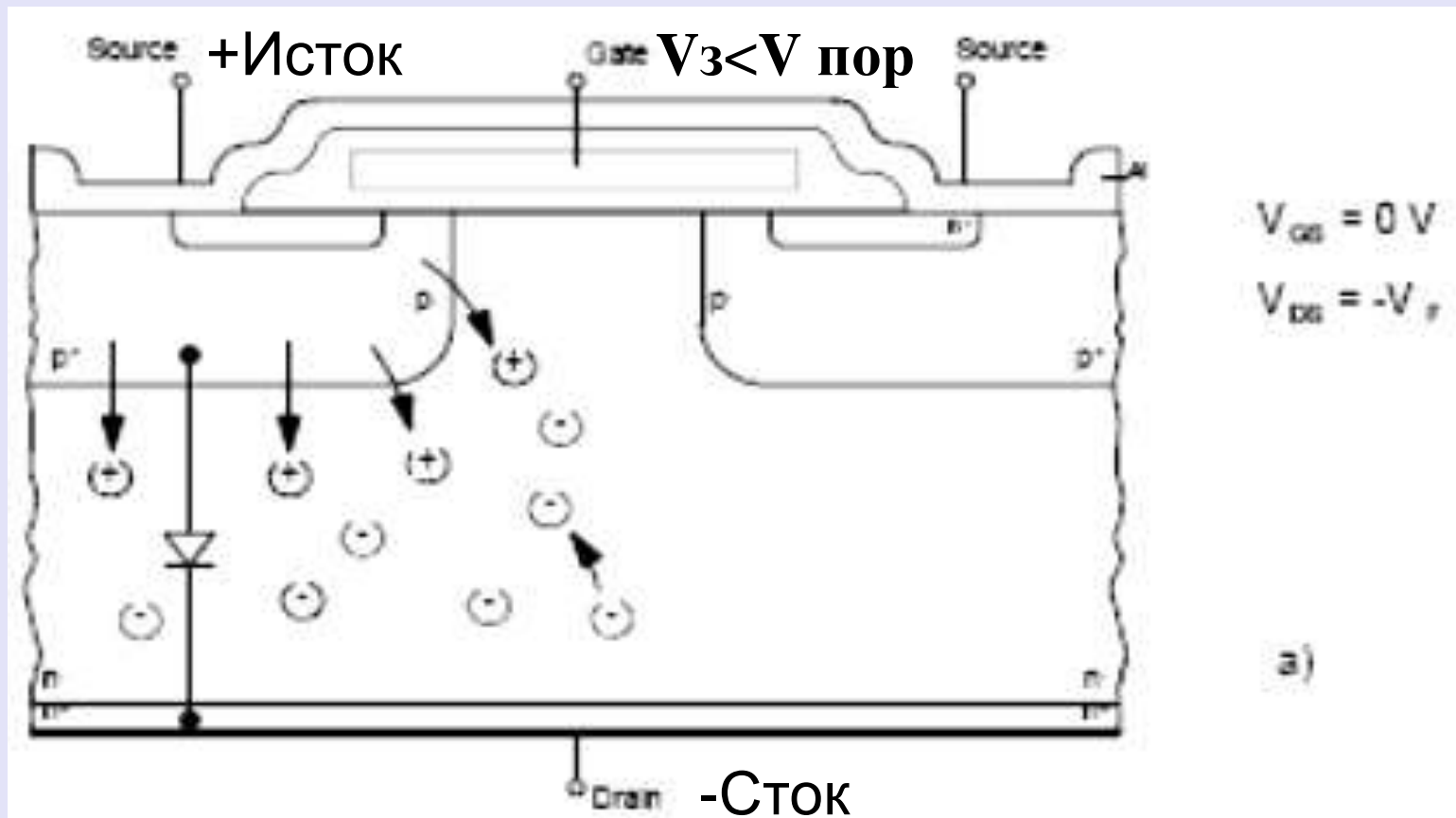
Дрейфовая область

Эмиттер

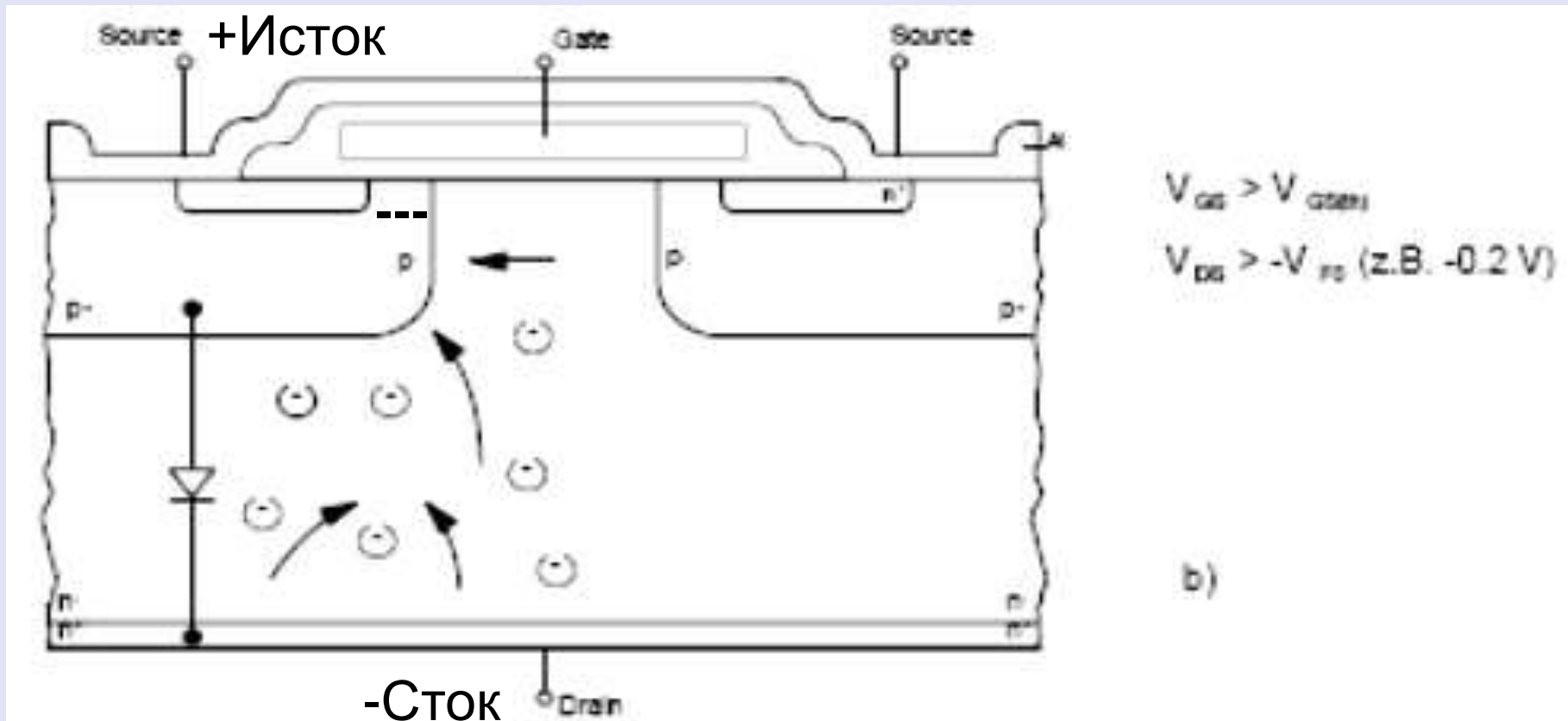
Так как во всех мощных МОП-транзисторах p -эмиттер соединен накоротко с истоком, положительное напряжение стока смещает переход p -база – n -дрейфовая область в обратном направлении. Обедненный слой расширяется главным образом в n -дрейфовую область, потому что p -база имеет более высокий уровень легирования. Для обеспечения более высокого запирающего напряжения стока необходимо уменьшить легирование дрейфовой области и увеличить ее толщину, что приведет к росту сопротивления протеканию тока в открытом состоянии.

Это сопротивление определяется последовательным сопротивлением канала и дрейфовой области.

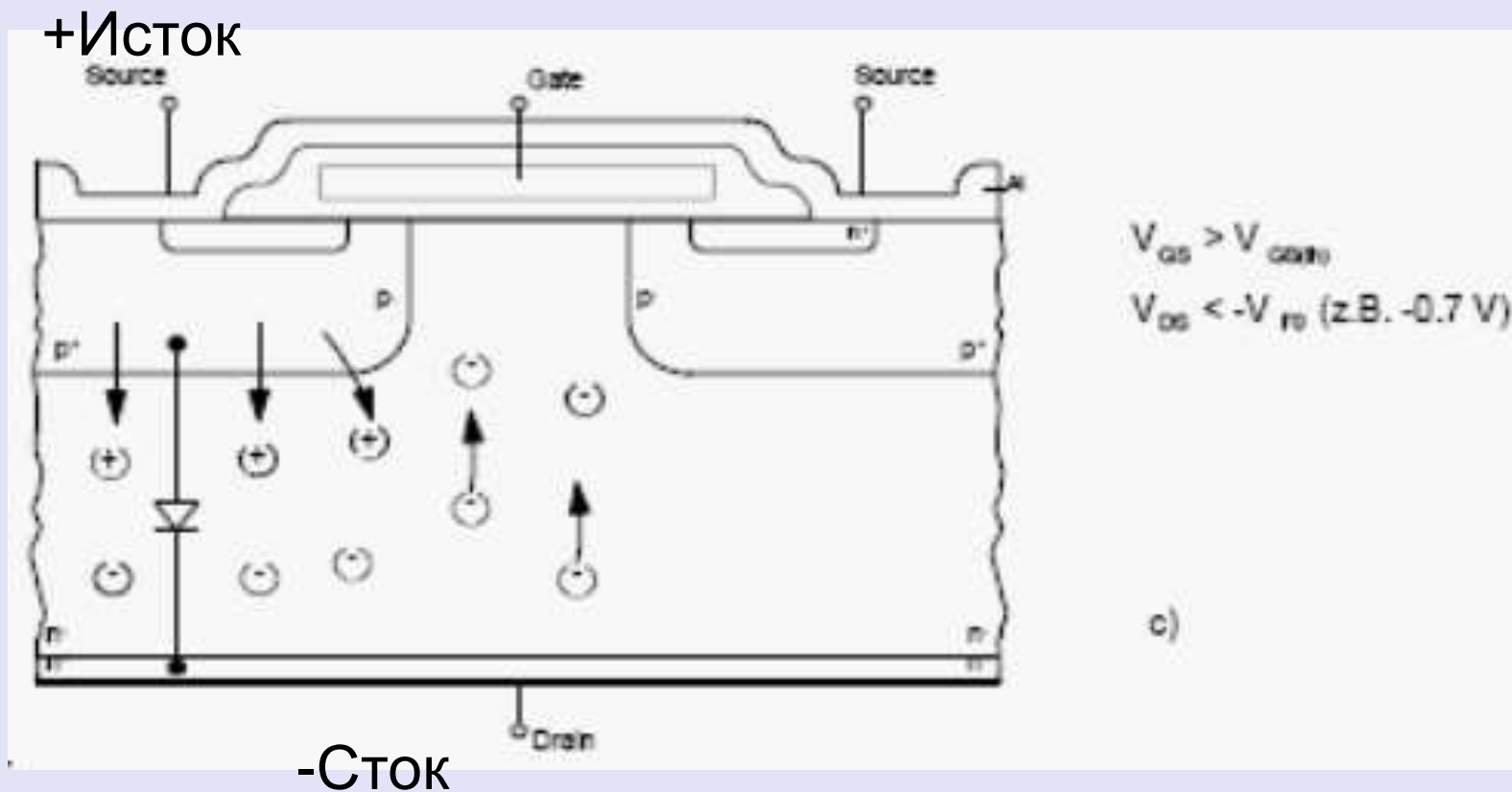
Работа при обратном напряжении силового МДП ПТ закрытый канал (биполярный ток)



Работа при обратном напряжении силового МДП ПТ открытый канал и малое отрицательное напряжение $V_{СИ}$ (полевой ток)



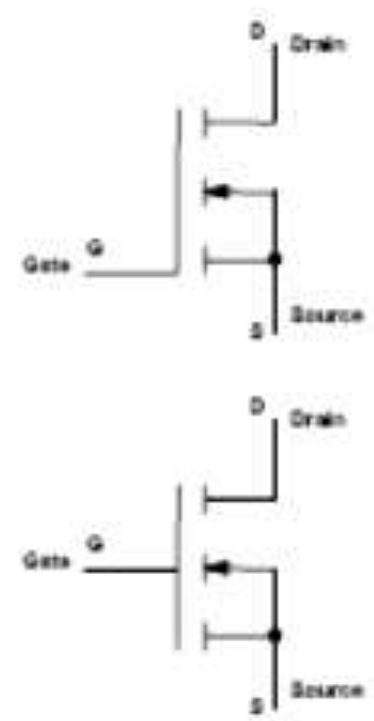
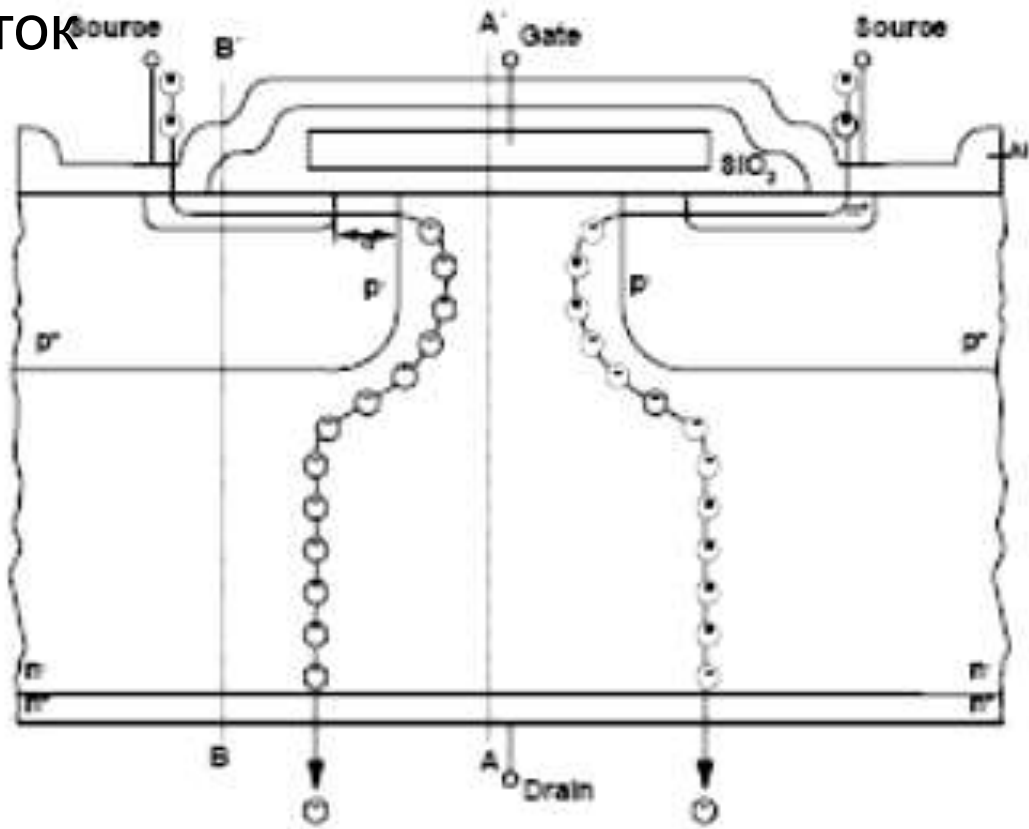
Работа при обратном напряжении силового МДП ПТ открытый канал и большое отрицательное напряжение $V_{СИ}$ (комбинированный ток)



Силовой MOSFET

ВО ВКЛЮЧЕННОМ СОСТОЯНИИ

-Исток



a)

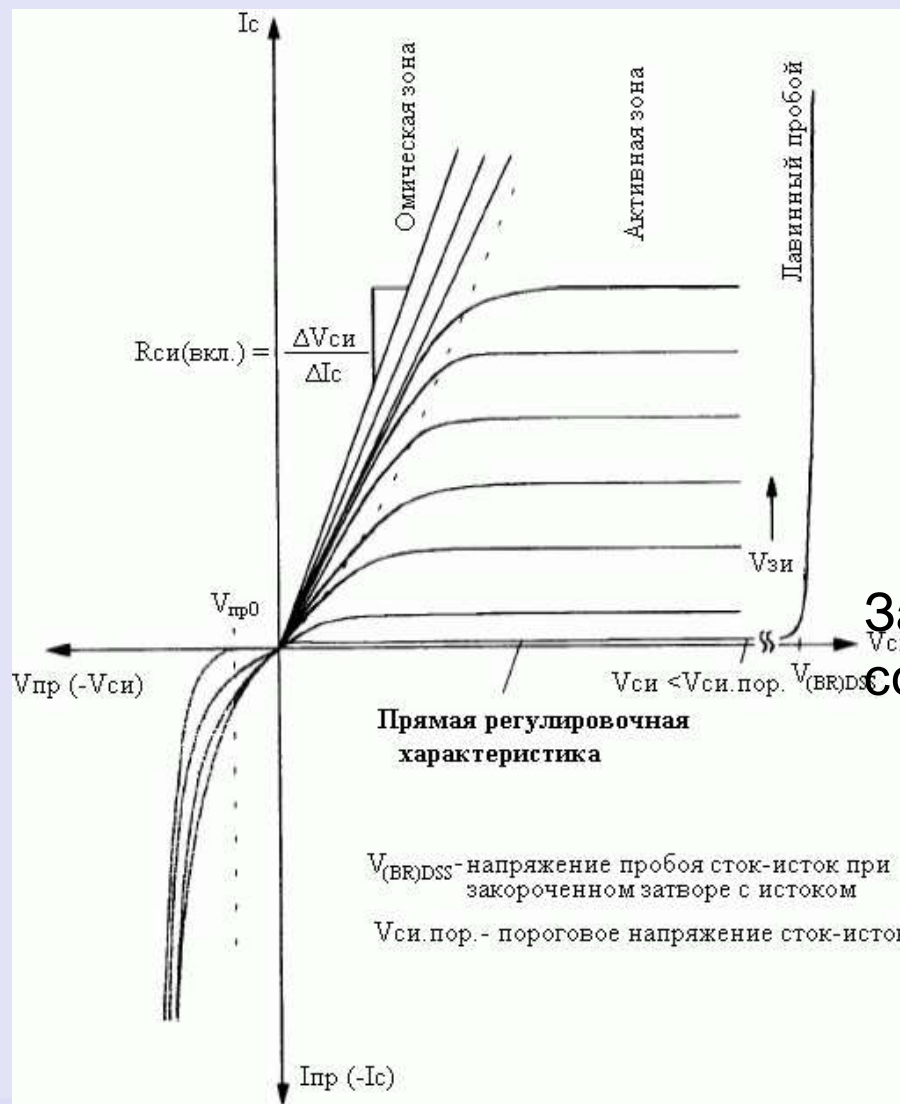
b)

+Сток

A-B: wide of elementary cell
d: length of channel

В рабочем режиме (затвор – Gate – открыт, на сток – Drain относительно истока – Source – подано положительное смещение) электроны текут из канала через n -область в сильнолегированную n^+ -область, а затем во внешнюю цепь стока

Основная выходная характеристика силового транзисторного модуля



Закрытое состояние

Работа при обратном напряжении

При обратном напряжении (третий квадрант) характеристика МДП ПТ эквивалентна диодной при $V_{зс} < V_{зс(пор)}$. Это происходит из-за паразитного диода в МДП ПТ

Закрытое состояние при прямом напряжении

При приложении положительного напряжения затвор-исток $V_{зи}$, меньшего, чем пороговое напряжение $V_{зс(пор)}$, между стоком и истоком будет протекать только очень малый ток I_{DSS} . I_{DSS} будет расти очень медленно с ростом $V_{си}$. По достижении определенного установленного значения напряжения сток-исток $V_{(BR)DSS}$, происходит лавинный пробой перехода p^+ ячейка/ n -дрейфовая зона/ n^+ эпитаксиальный слой.

Физически $V_{(BR)DSS}$ почти всегда эквивалентно напряжению пробоя V_{CER} паразитного биполярного $n-p-n$ -транзистора в МДП ПТ, созданного последовательностью слоев: n^+ -истоковая зона/ n -дрейфовая зона/ n^+ -эпитаксиальный слой (коллектор). Увеличенный ток, созданный лавинным пробоем диода коллектор-база, может привести к разрушению МДП ПТ.

Включенное состояние

Прямое включенное состояние при положительном напряжении стока $V_{СИ}$ и прямой ток I_C могут быть разделены на две характерных области (рисунок 6.9, первый квадрант). Величина сопротивления на начальном участке (Омическая зона) определяет предельный ток стока в открытом состоянии силового МОП ПТ. Прямое напряжение $V_{СИ}$ может быть определено следующим уравнением:

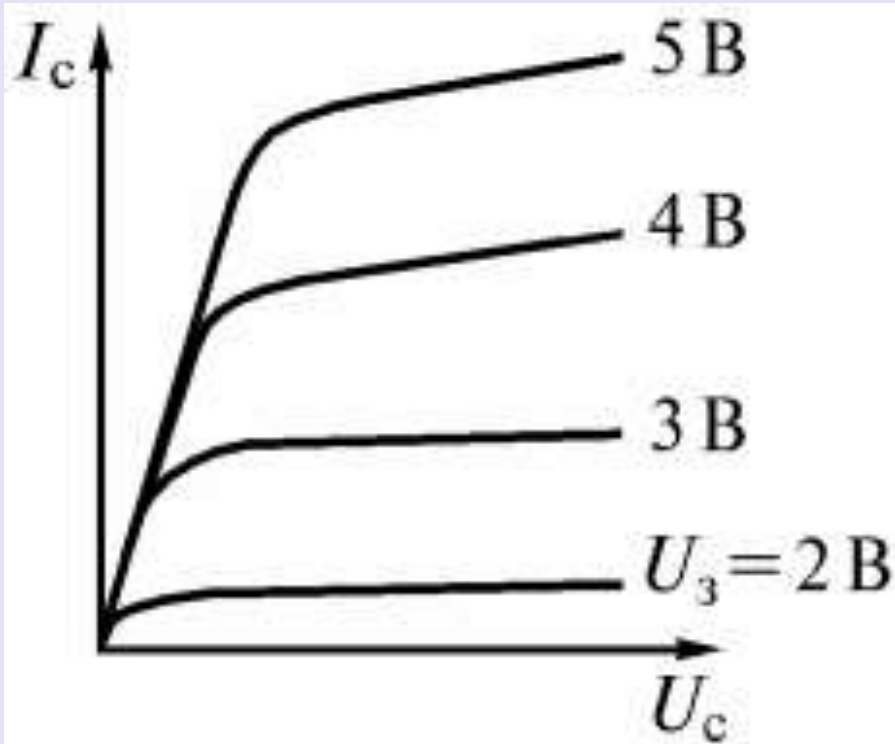
$$V_{СИ(вкл)} = I_C \cdot R_{СИ(вкл)}$$

В случае высоких напряжений на стоке (в области пологих характеристик) ток стока достигает насыщения (активная зона ВАХ).

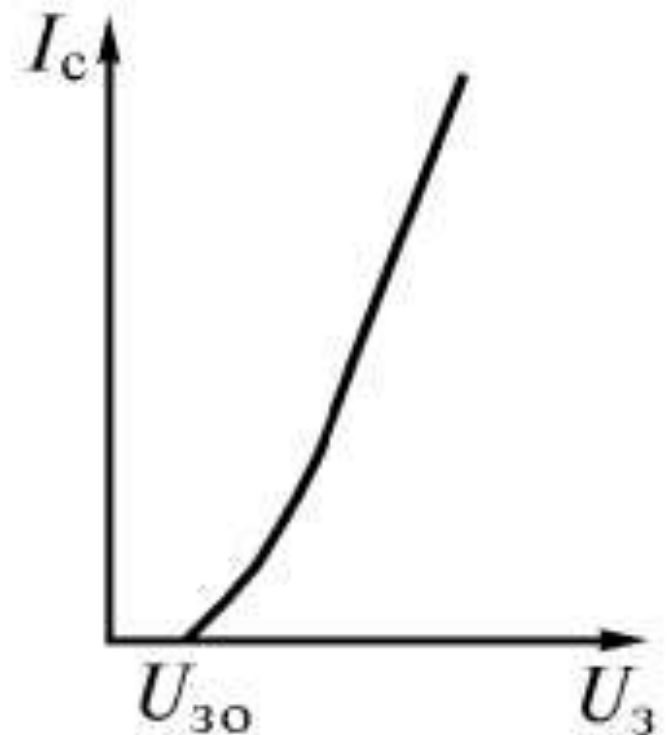
Важным параметром силовых МОП транзисторов является крутизна характеристики (в зарубежной литературе ее обозначают g), определяемая как отношение тока стока к изменению напряжения на затворе. Желательно иметь большую крутизну, чтобы получить высокую способность управления током с уменьшением управляющего напряжения на затворе.

Крутизна падает с повышением температуры кристалла.

**Выходные (а) и передаточные (б)
характеристики ПТИЗ с
индуцированным каналом для
схемы с ОИ**



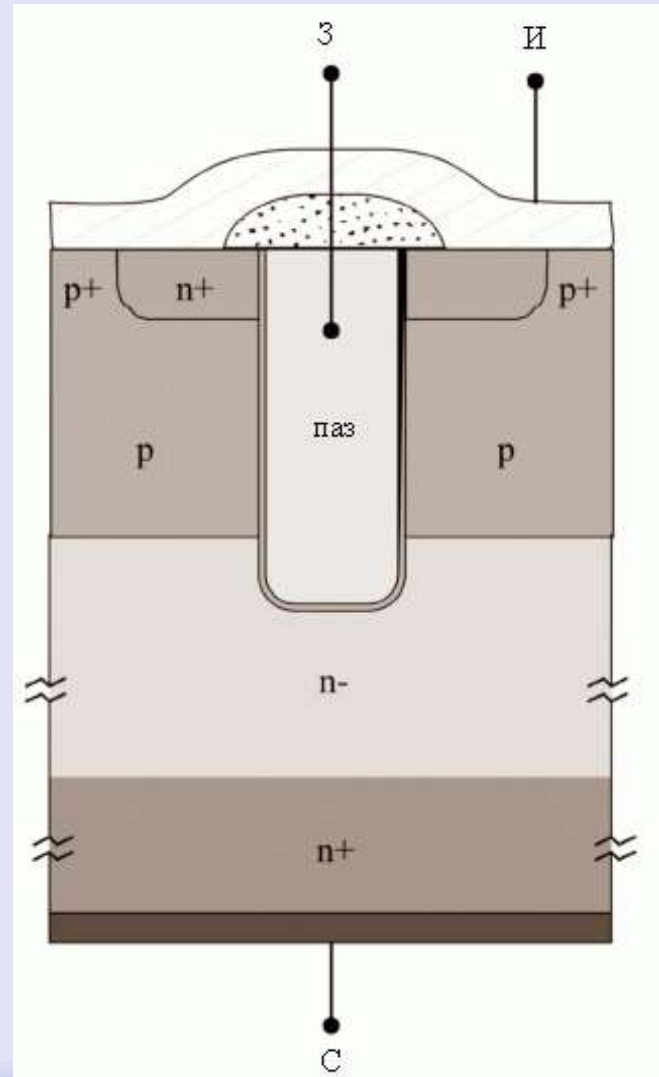
а)



б)

Чтобы перевести МОП-транзистор в закрытое состояние необходимо уменьшить напряжение смещения затвора, электроны перестают индуцироваться в канале, путь от истока к стоку (ток от стока к истоку) пропадает. В отличие от биполярного транзистора при переключении не требуется времени на рассасывание неосновных носителей тока, поэтому можно получить время выключения 10...100 нс (надо разрядить входную емкость затвора транзистора).

Структура U-образного МОП-транзистора



Устройство и особенности работы IGBT

IGBT –

- полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого трехслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком.

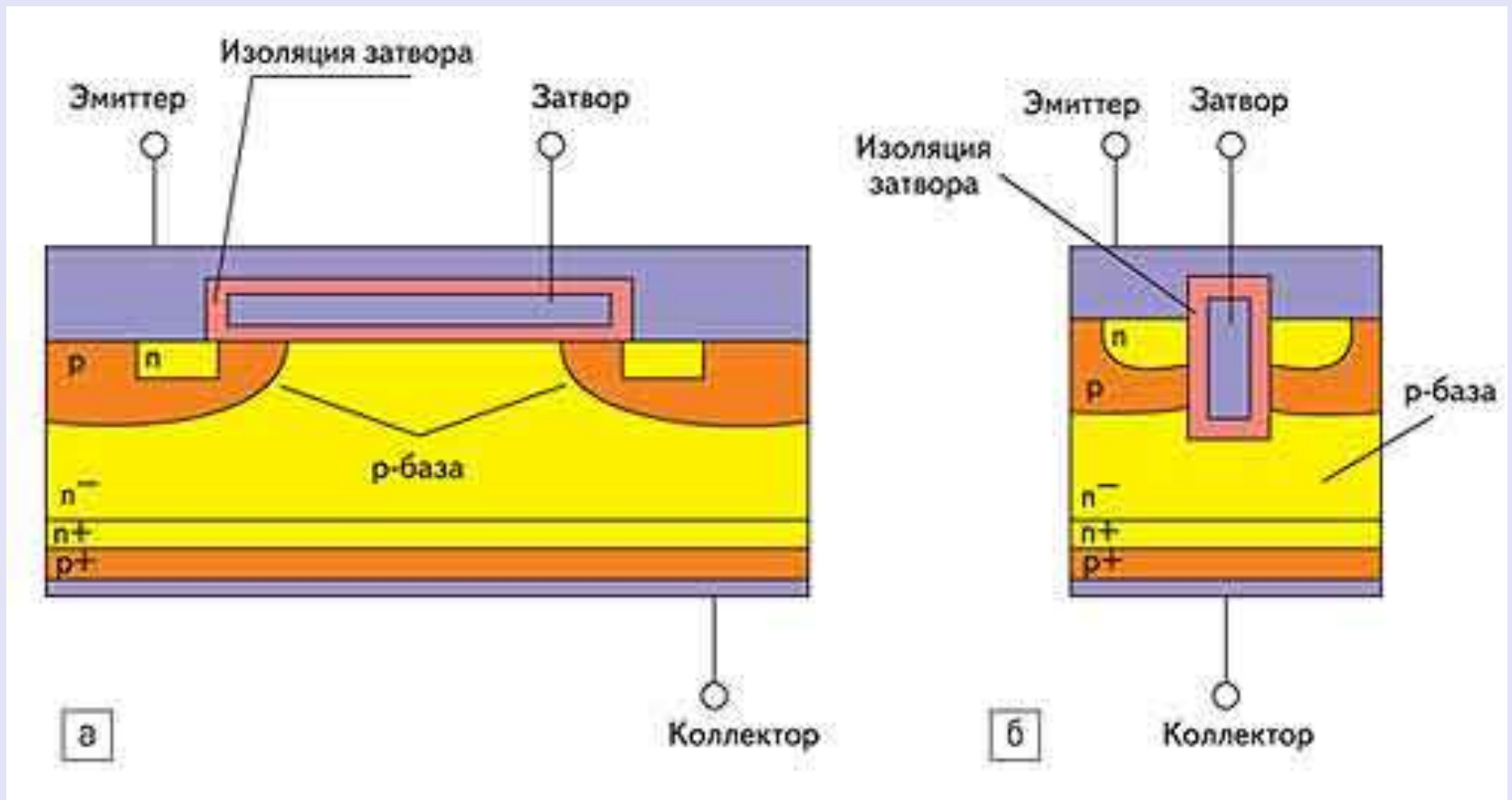
Для IGBT с номинальным напряжением в диапазоне 600-4000 В в полностью включённом состоянии прямое падение напряжения, так же как и для биполярных транзисторов, находится в диапазоне 1,5-3,5 В. Это значительно меньше, чем характерное падение напряжения на силовых MOSFET в проводящем состоянии с такими же номинальными напряжениями.

IGBT-приборы являются компромиссным техническим решением, позволившим объединить положительные качества как биполярных (малое падение напряжения в открытом состоянии, высокие коммутируемые напряжения), так и MOSFET-транзисторов (малая мощность управления, высокие скорости коммутации).

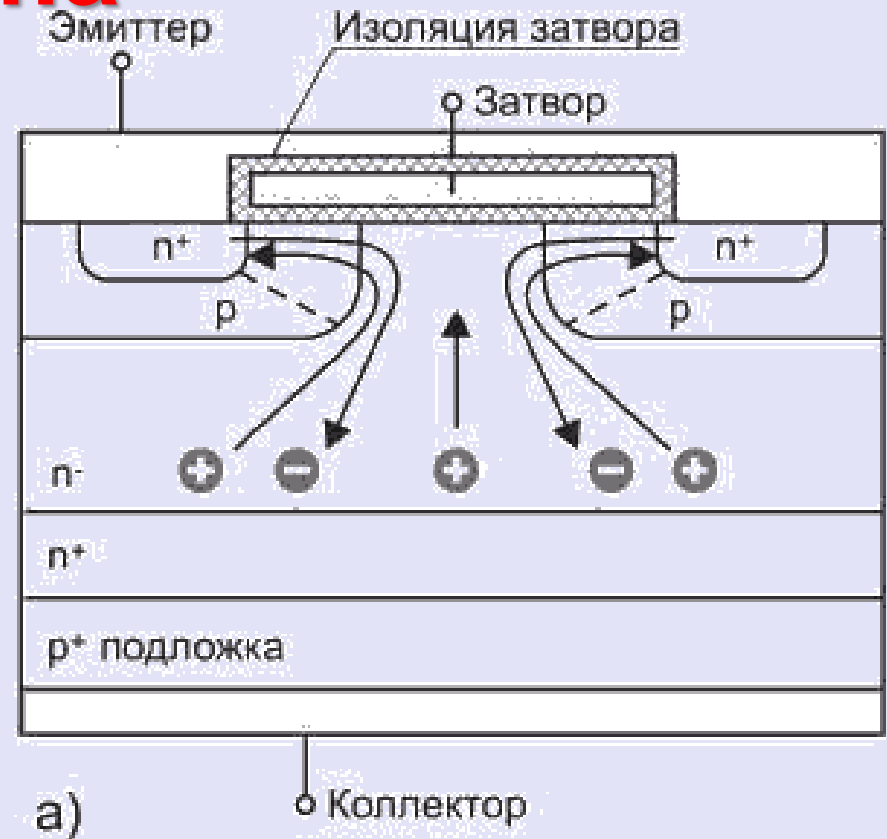
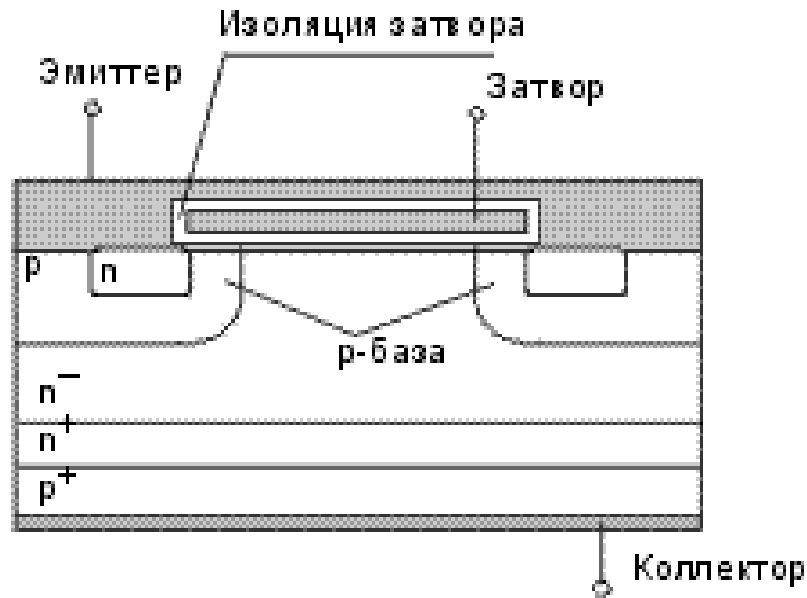
По быстродействию IGBT уступают МДП ПТ, но значительно превосходят биполярные. Типичные значения времени рассасывания накопленного заряда и спадания тока при выключении IGBT находятся в диапазонах 0,2-0,4 и 0,2-1,5 мкс, соответственно.

Структуры IGBT

а) планарного типа; б) изготовленная по технологии «trench-gate» ("утопленного" канала)



Структура IGBT планарного типа

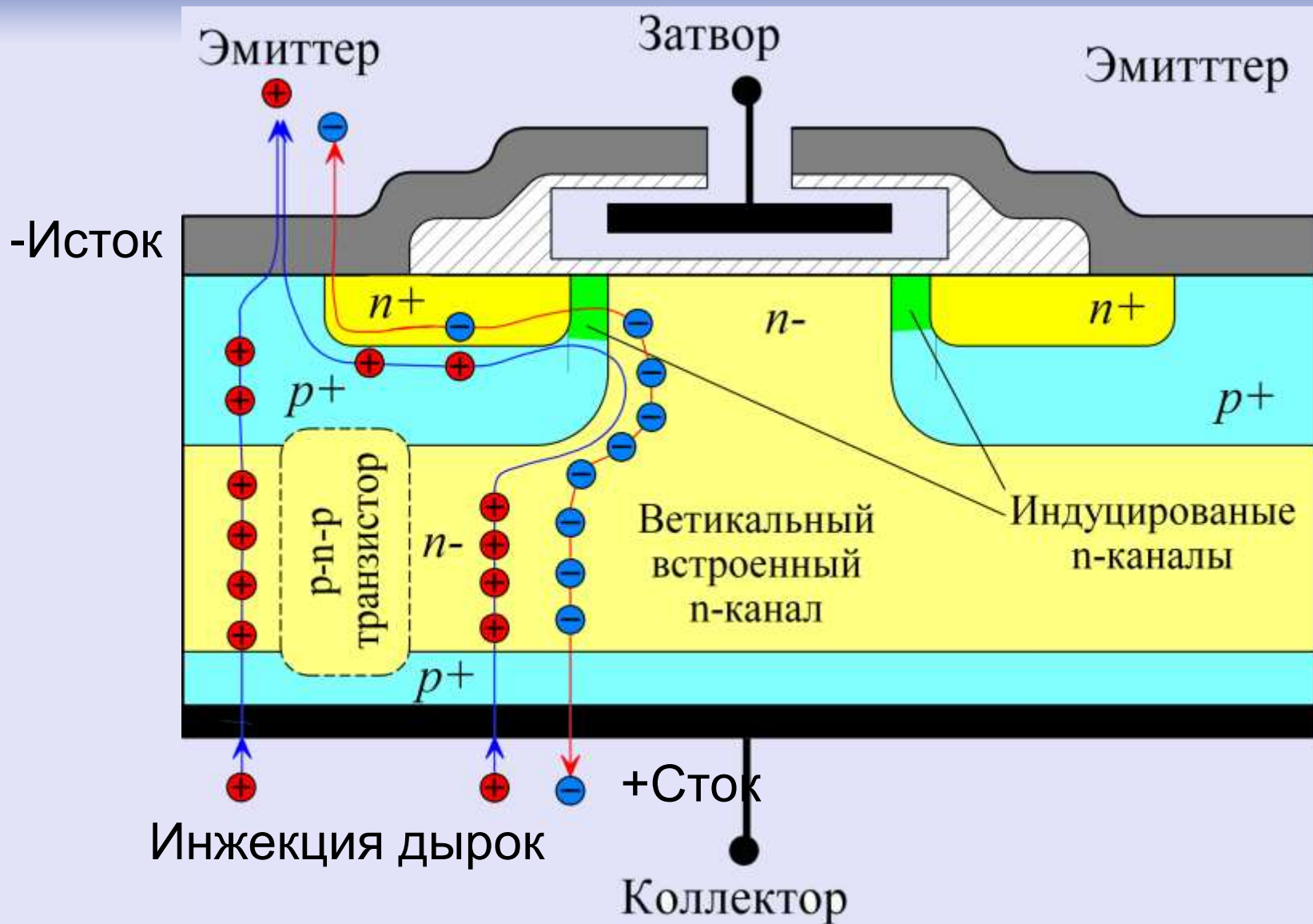


IGBT содержит p^+ -проводящую область с соединением к коллектору ниже n -зоны

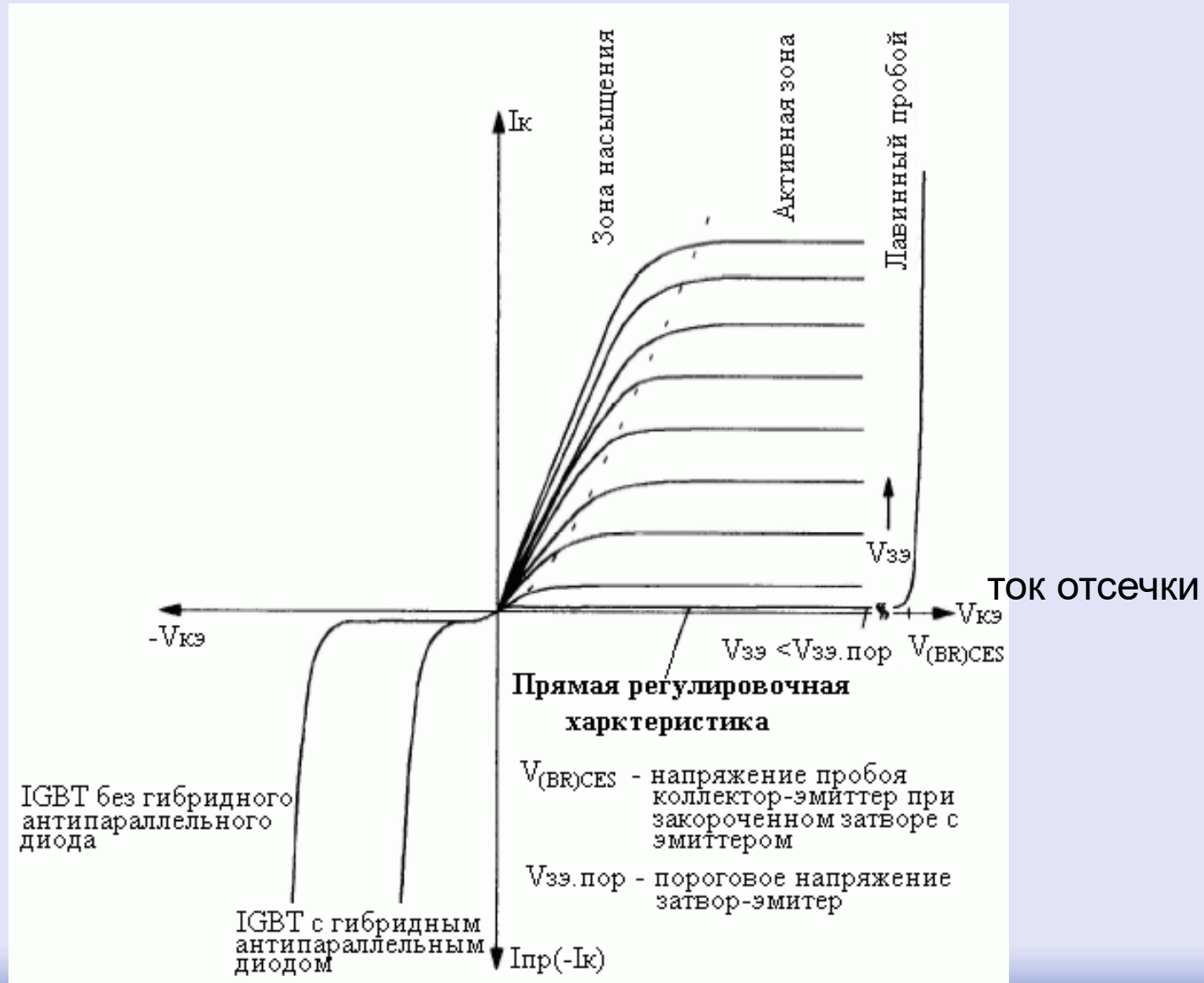
Биполярный транзистор образован слоями p^+ (эмиттер), n (база), p (коллектор); полевой – слоями n (исток), n^+ (сток) и металлической пластиной (затвор). Слои p^+ и p имеют внешние выводы, включаемые в силовую цепь. Затвор имеет вывод, включаемый в цепь управления.

При подаче на изолированный затвор положительного смещения, превышающего пороговое, возникает проводящий канал в p -области и МДП транзистор открывается. Электроны из истока МДП ПТ по каналу поступают в стоковую область МДП ПТ (дрейфовая область). Эта область является n -базой p - n - p транзистора. Поступающие электроны понижают потенциальный барьер нижнего прямо смещенного эмиттерного перехода, что приводит к инжекции дырок из p^+ -эмиттера p - n - p транзистора в область n -базы, обеспечивая открытие биполярного p - n - p транзистора. Коллекторный верхний переход всегда находится при обратном смещении, поэтому p - n - p транзистор не попадает в режим насыщения. Между внешними выводами ячейки – коллектором и эмиттером начинает протекать ток. При этом ток стока МДП транзистора оказывается усиленным в $(\beta+1)$ раз.

СТРУКТУРА IGBT



ВАХ IGBT



При превышении определенного максимального напряжения коллектор-эмиттер $V_{(BR)CES}$, происходит лавинный пробой перехода p^+ -область/ n^- -дрейфовая зона/ n^+ -эпитаксиальный слой (напряжение пробоя $V_{(BR)CES}$).

Включенное состояние

Для IGBT прямое открытое состояние при положительном напряжении коллектор-эмиттер V_{KE} и прямом токе коллектора I_K также можно разделить на две характерных области

Активный участок

При незначительном превышении напряжением затвор-эмиттер V_{3E} порогового $V_{3E(пор)}$, токовое насыщение станет причиной значительного падения напряжения на канале (горизонтальная область на выходной характеристике). Ток коллектора I_K контролируется при помощи V_{3E} .

Крутизна характеристики прямой передачи g :

$$g = dI_K/dV_{3E} = I_K/(V_{3E} - V_{3E(пор)}).$$

Усилительные свойства IGBT-прибора характеризуются крутизной g , которая определяется усилительными свойствами МДП и биполярного транзисторов в структуре IGBT. Соответственно, значение крутизны для IGBT является более высоким в сравнении с биполярными и МДП транзисторами.

Область насыщения

Область насыщения (крутой подъем кривой выходной характеристики), также называемая открытым состоянием при переключении. Характер изменения кривой во включенном состоянии можно характеризовать напряжением IGBT $V_{КЭ(нас)}$ (напряжение насыщения коллектор-эмиттер). По крайней мере, для хорошо запираемых IGBT напряжение насыщения намного меньше, чем напряжение, требуемое для включения такого же МДП ПТ, благодаря тому, что n – дрейфовая зона заполняется неосновными носителями.

Работа при обратном напряжении

При обратном напряжении (третий квадрант), коллекторный pn -переход IGBT смещен в обратном направлении и закрыт, в противоположность МДП ПТ. Также, благодаря большой n дрейфовой зоне, обратное напряжение для современных IGBT всего около 10 В.

Дальнейшее развитие IGBT связано с требованиями рынка и будет идти по пути:

- повышения диапазона предельных коммутируемых токов и напряжений (единицы килоампер, 5-7 кВ);
- повышения быстродействия;
- повышения стойкости к перегрузкам и аварийным режимам;
- снижения прямого падения напряжения;
- разработка новых структур с плотностями токов, приближающихся к тиристорным;
- развития "интеллектуальных" IGBT (с встроенными функциями диагностики и защит) и модулей на их основе;
- создания новых высоконадёжных корпусов, в том числе с использованием MMC (AlSiC) и прижимной конструкции;
- повышения частоты и снижение потерь SiC быстровосстанавливающихся обратных диодов;
- применения прямого водяного охлаждения для исключения соединения основание - охладитель.