

Твердотельная электроника

Презентации к лекционному курсу

Полевые транзисторы

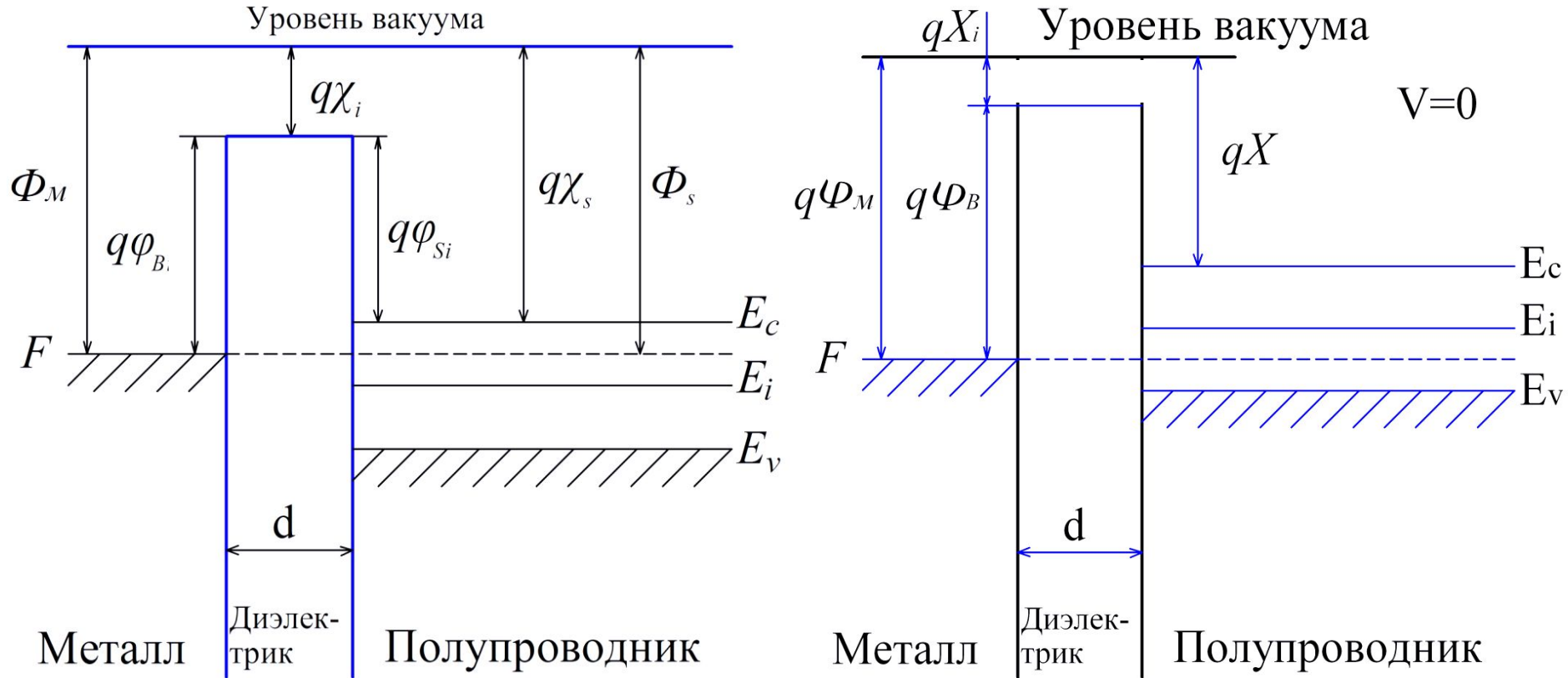
МДП-СТРУКТУРЫ

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 п/п-ка и, соответственно, её проводимость.

Этот эффект положен в основу ряда п/п-ковых устройств, среди которых самое известное – **МДП-транзистор**.

ИДЕАЛЬНАЯ МДП-СТРУКТУРА



На границе металл-диэлектрик (изолятор), диэлектрик-полупроводник возникает *контактная разность потенциалов*:

$$q\varphi_B = \Phi_M - \Phi_i;$$

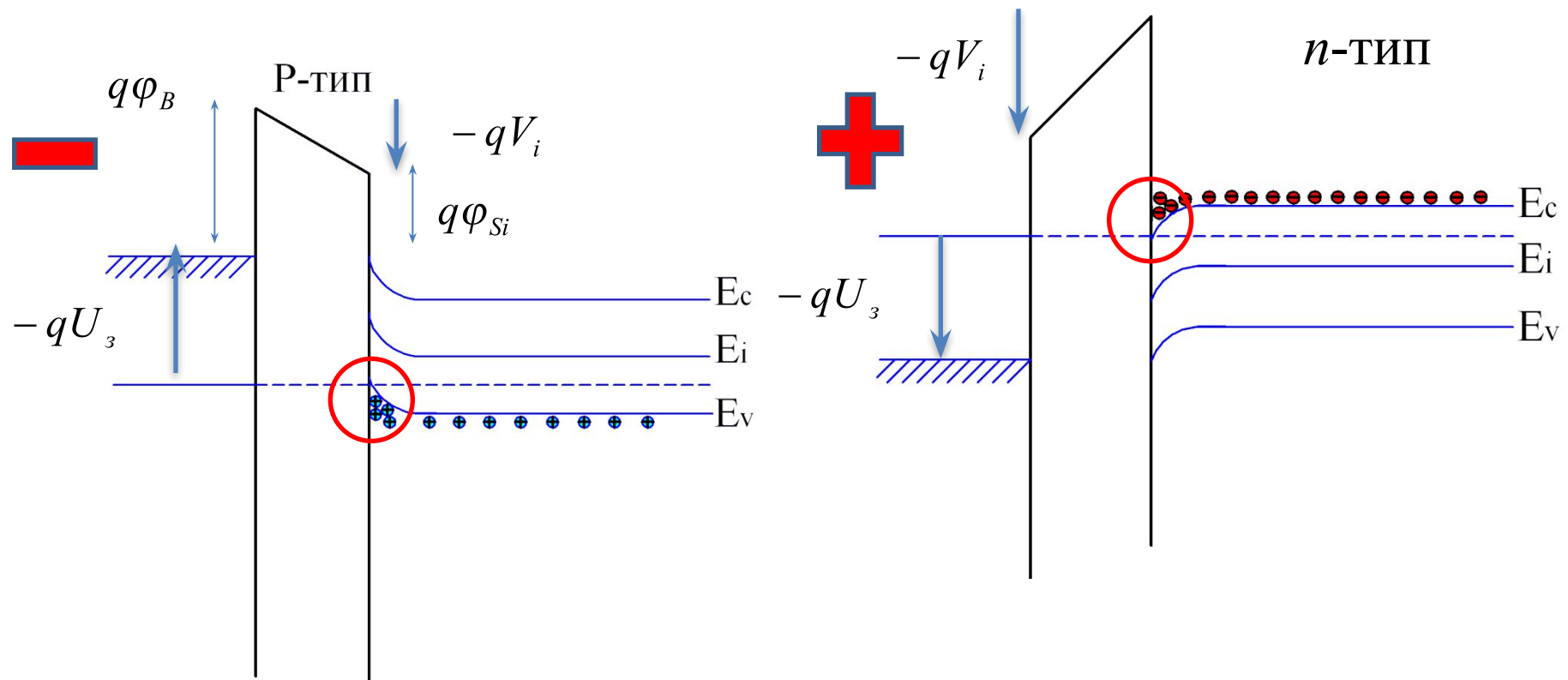
Допущения для «идеальной» МДП-структуры

- Диэлектрик является идеальным изолятором.
- В диэлектрике и на границах раздела металл-диэлектрик и п/п-к-диэлектрик нет никаких зарядов, т.е. диэлектрик не имеет дефектов.

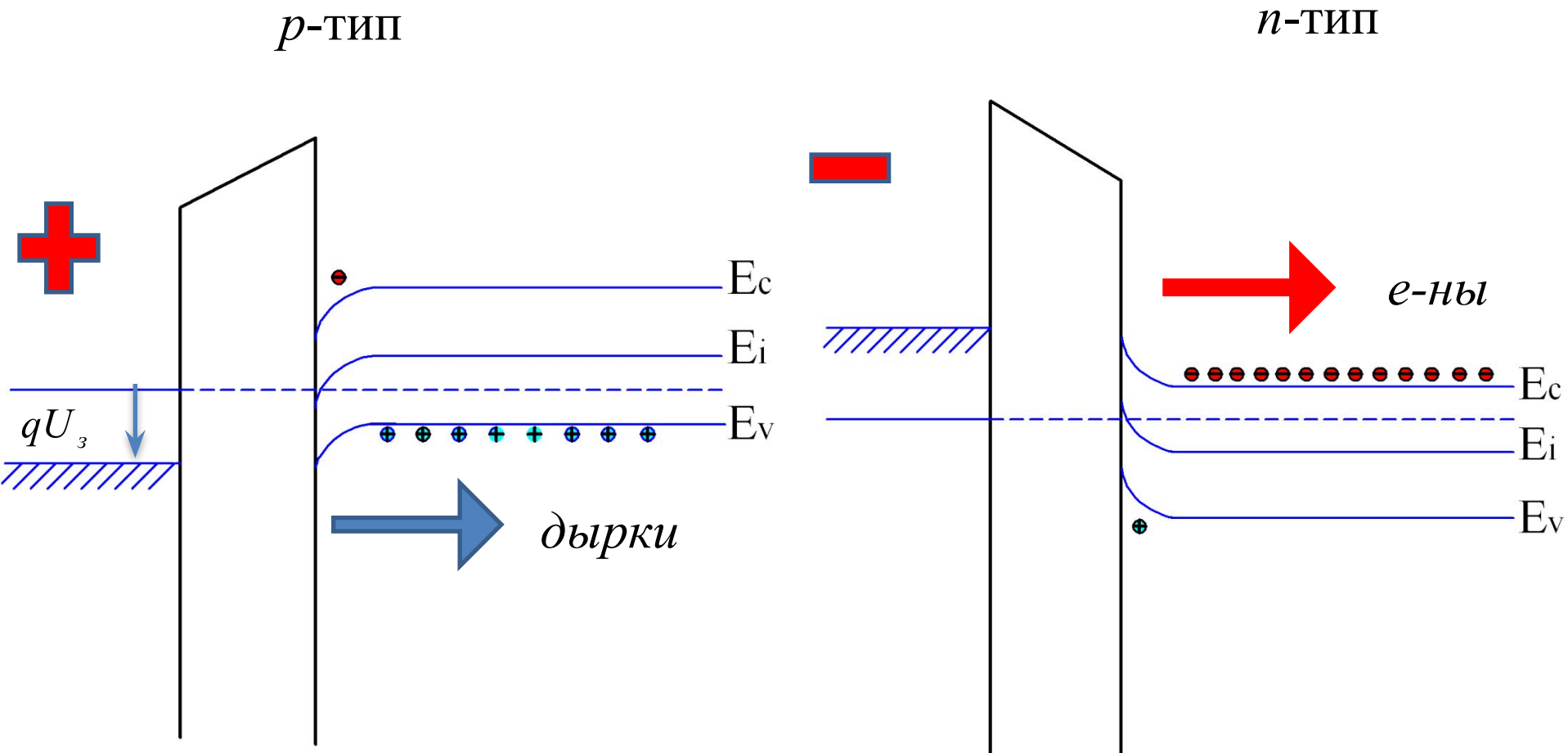
При любых смещениях в структуре могут существовать только заряд в ее п/п-ковой части и равный ему заряд противоположного знака на металлическом электроде, отделенном от п/п-ка слоем диэлектрика.

Если к МДП-структуре приложить эл. напряжение, то его обкладки зарядятся. В зависимости от знака и величины приложенного напряжения поверхность п/п-ка, будет *обогащаться* или *обедняться* ОНЗ, или произойдет *инверсия типа проводимости*

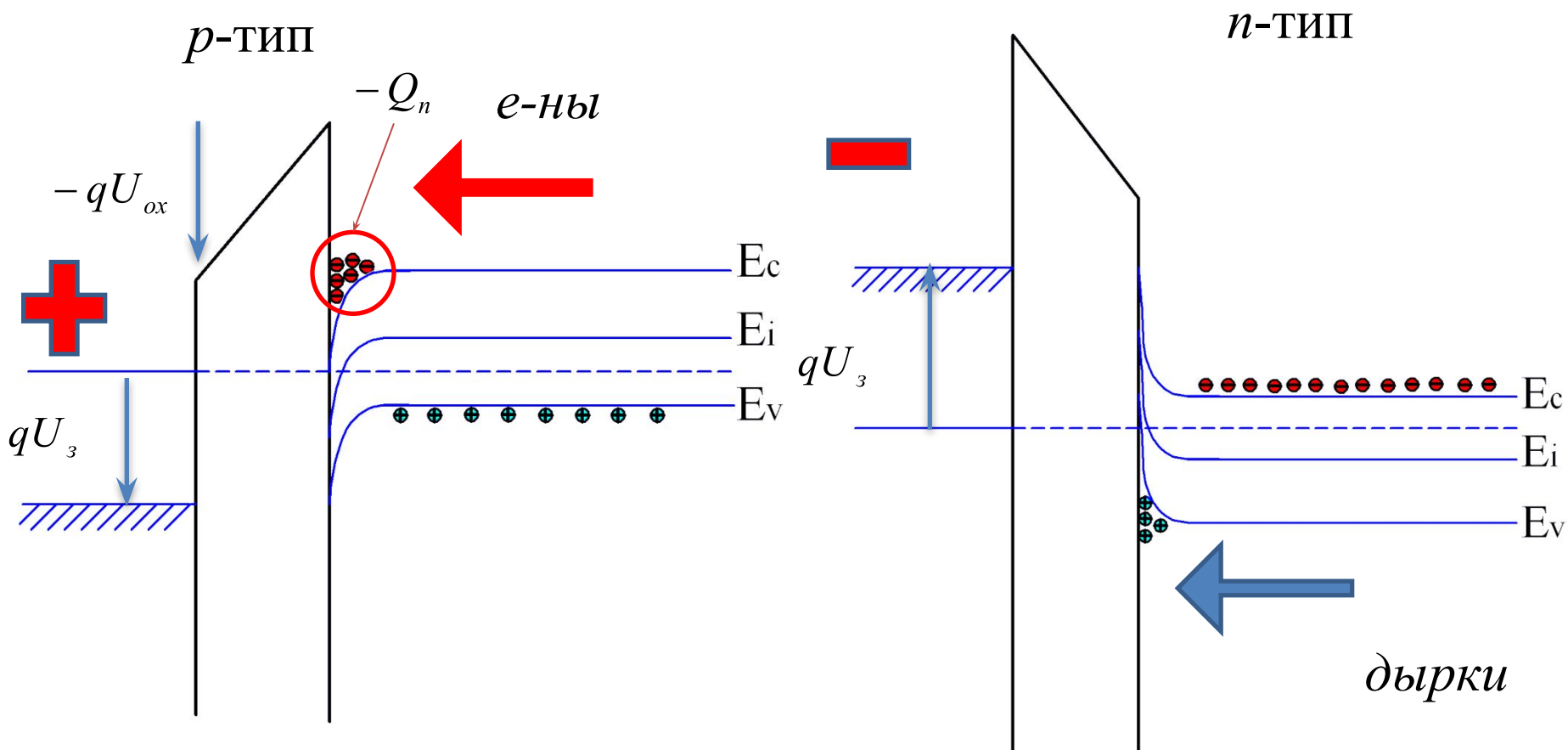
Режим обогащения



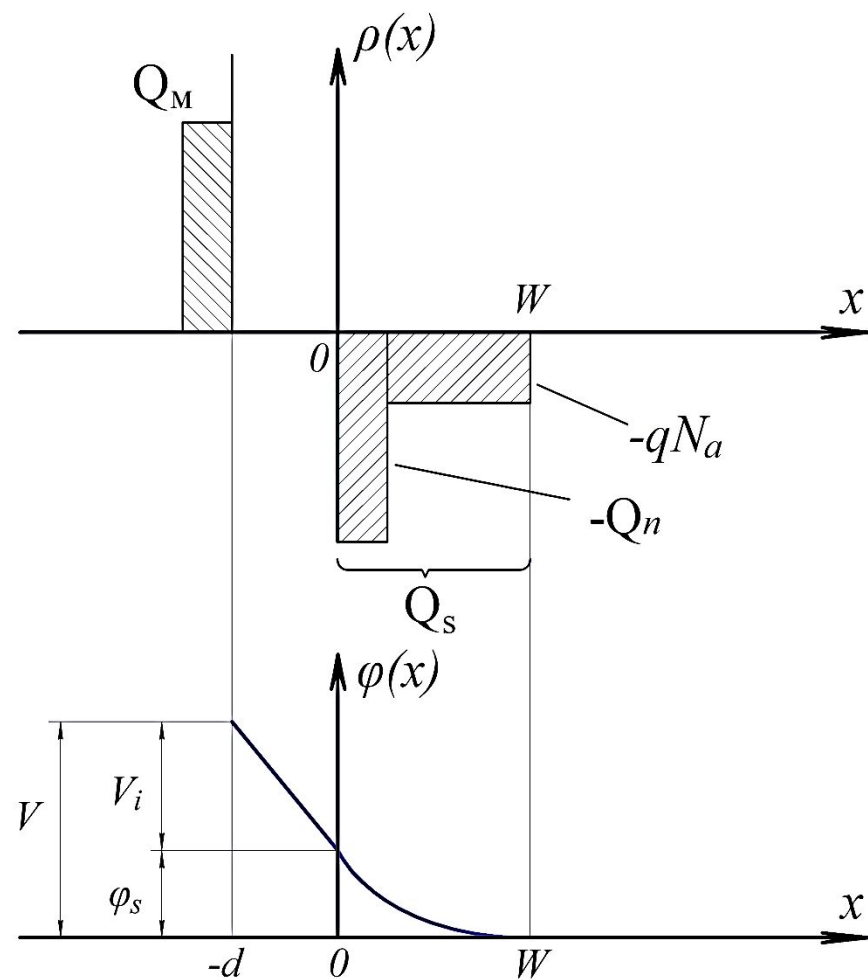
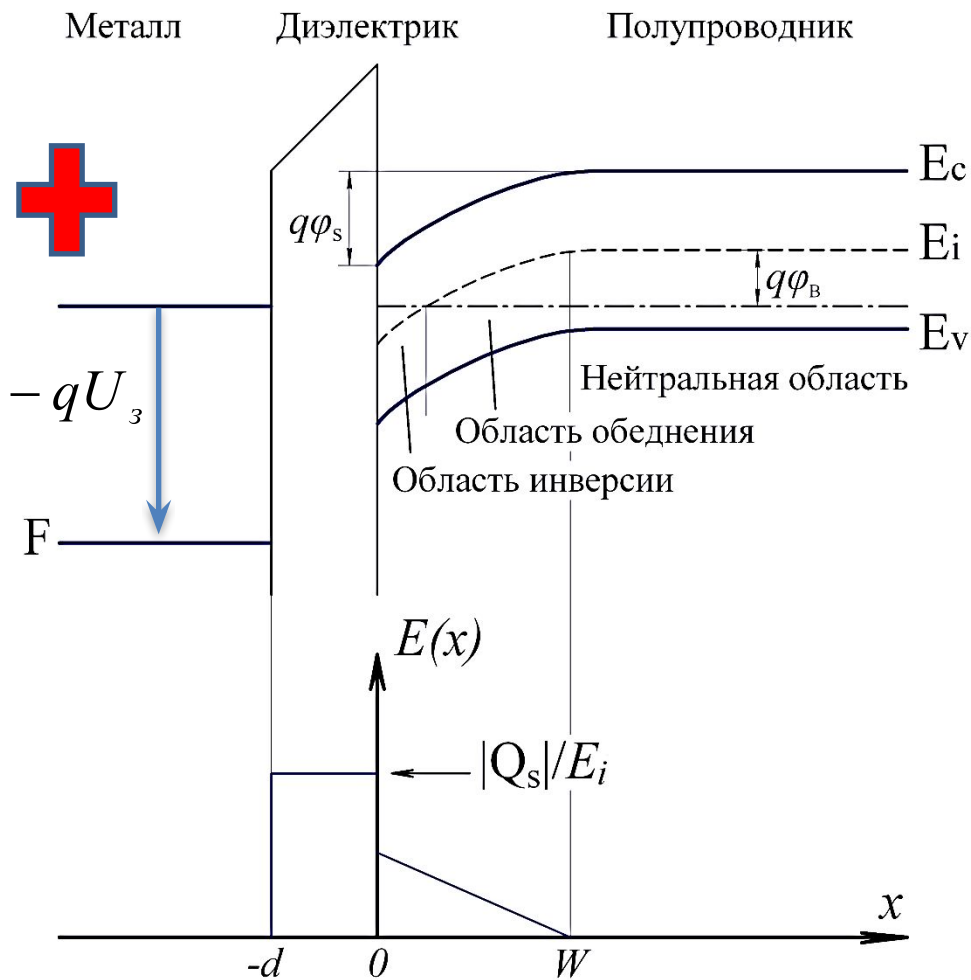
Режим обеднения



Инверсия типа проводимости



МДП-структура, инверсия типа проводимости



Для характеристики изгиба зон будем использовать понятие *поверхностного потенциала φ_s* . Рассмотрим п/п-к p -типа.

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

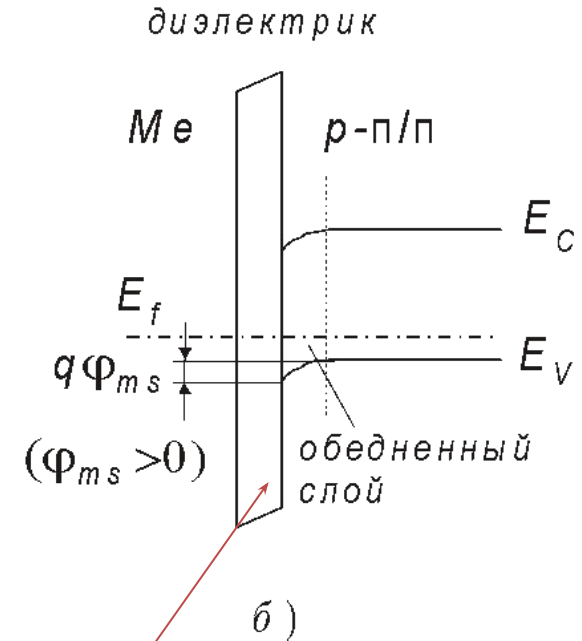
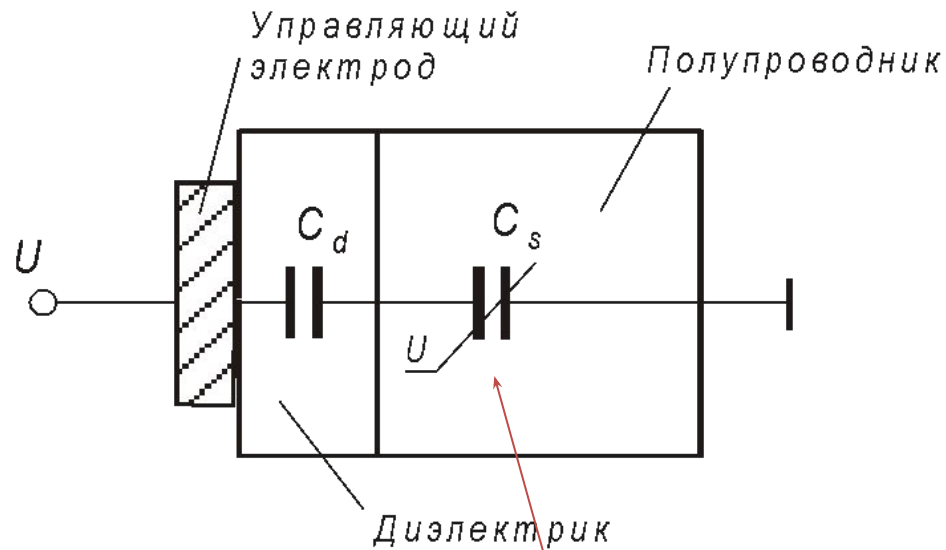
$$\varphi = 0; \quad \frac{d\varphi}{dx} = 0 \quad \text{при } x = w$$

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

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s \cdot \varphi_s}{q \cdot N_a^-}}$$

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

Емкость реальной МДП-структуры

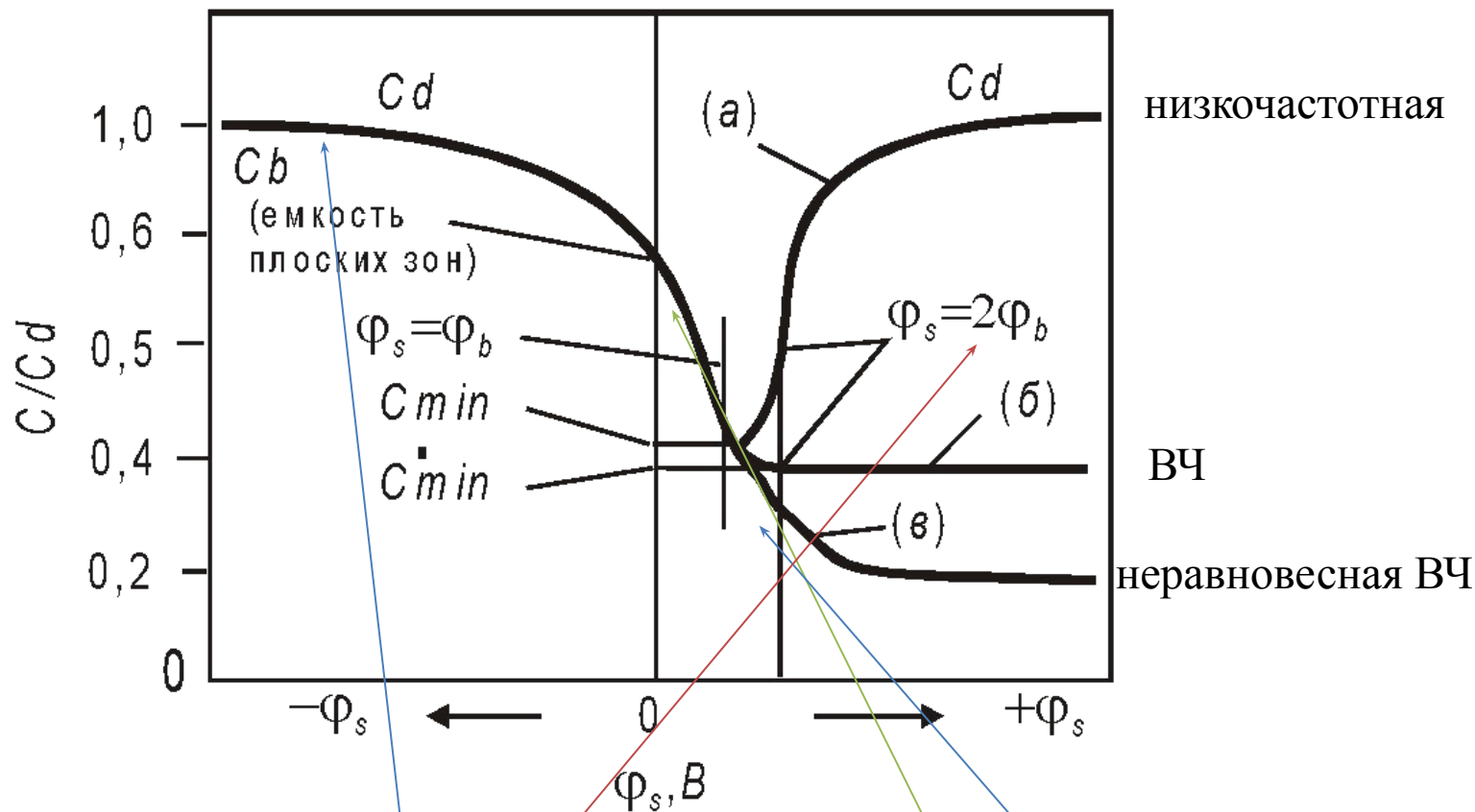


$$C_d = \frac{\epsilon_d \epsilon_0 \cdot S}{\delta_d}$$

$$C = \frac{C_d \cdot C_s}{C_d + C_s}$$

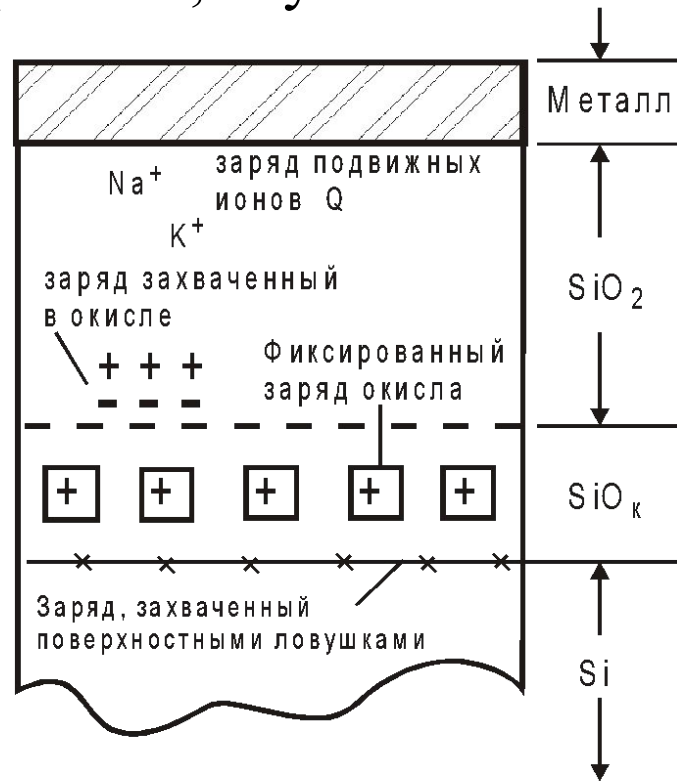
где ϵ_d — диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;
 S — площадь управляющего электрода; δ_d — толщина диэлектрика.
 Емкость полупроводника C_s является нелинейным элементом, т.к.
 определяется как конструктивными параметрами, так и
 напряжением смещения U .

C-V-характеристики идеальной МДП-структуры



Режимы МДП-структуры: **обогащения** ($\varphi_s < 0$), **обеднения** ($0 < \varphi_s < \varphi_b$), **слабой** ($\varphi_b < \varphi_s < 2\varphi_b$) и **сильной** ($\varphi_s > 2\varphi_b$) инверсий.

Из всех МДП-структур наиболее важными являются структуры металл – SiO_2 – Si (МОП). Отличие характеристик реальных МОП-структур от соответствующих зависимостей идеальных МДП-конденсаторов обусловлено существованием сложного распределения зарядов в окисле и возникновением поверхностного заряда в кремнии, обусловленного поверхностными ловушками

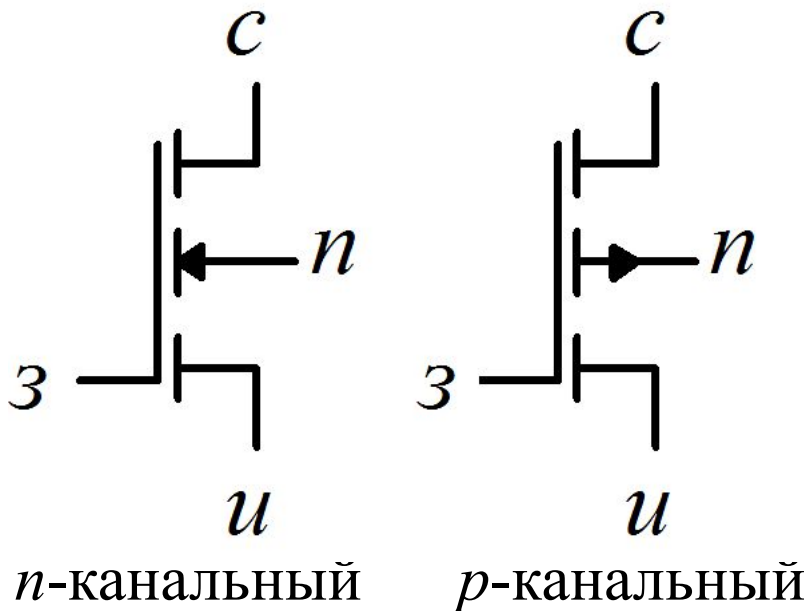


МДП-транзистор

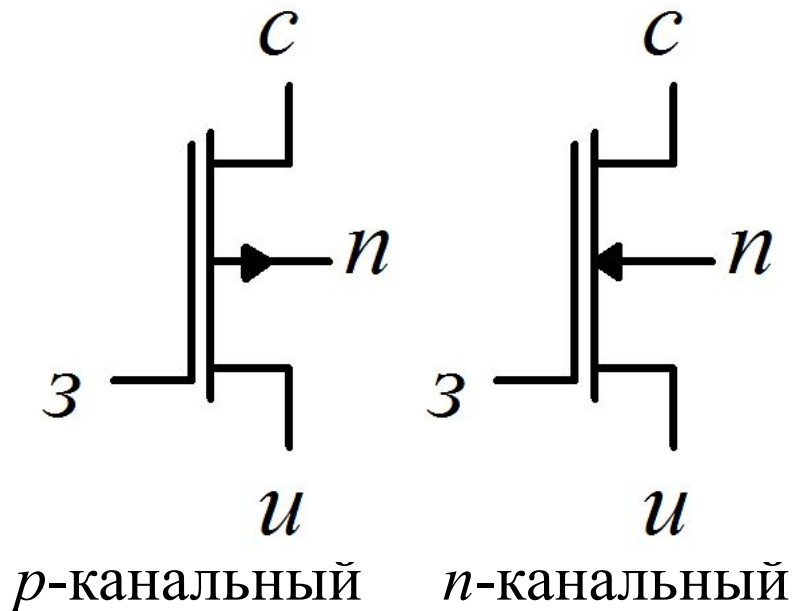
МДП-транзистор называют также **транзистором с изолированным затвором**, так как в отличие от ПТУП затвор от п/п-ка изолирован окислом.

Условные обозначения МДП-транзисторов

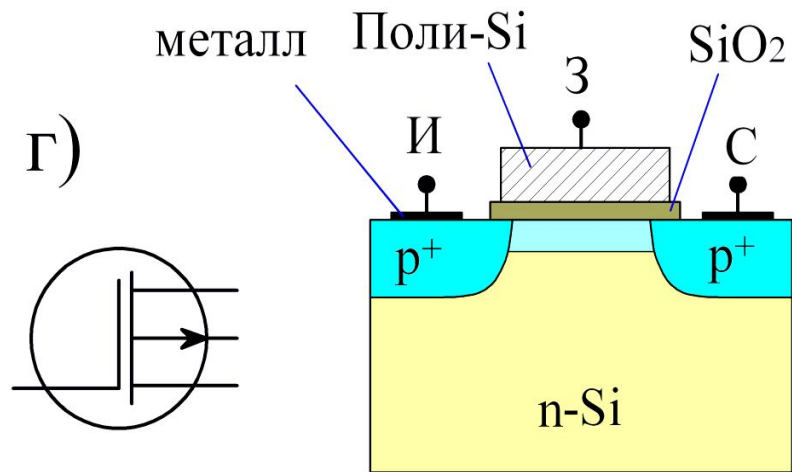
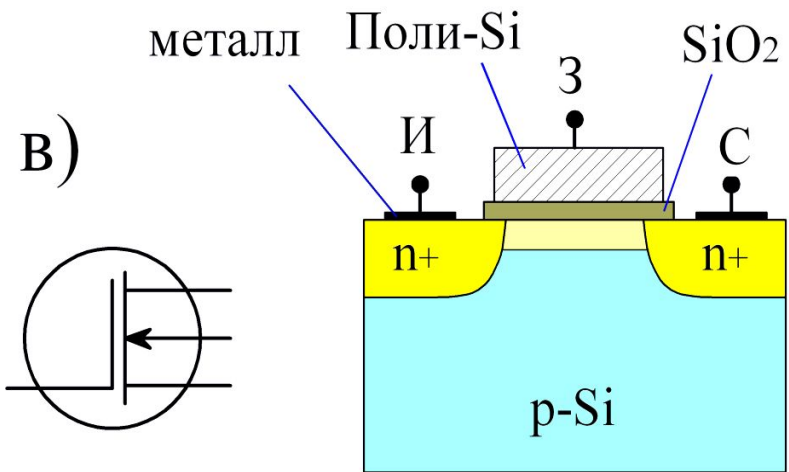
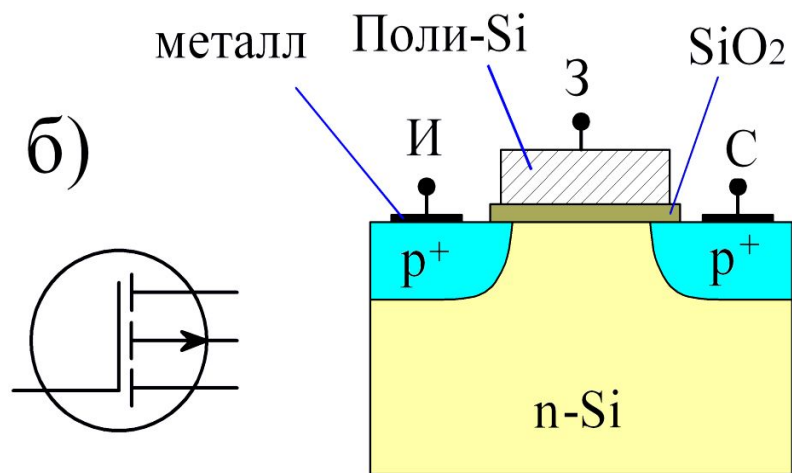
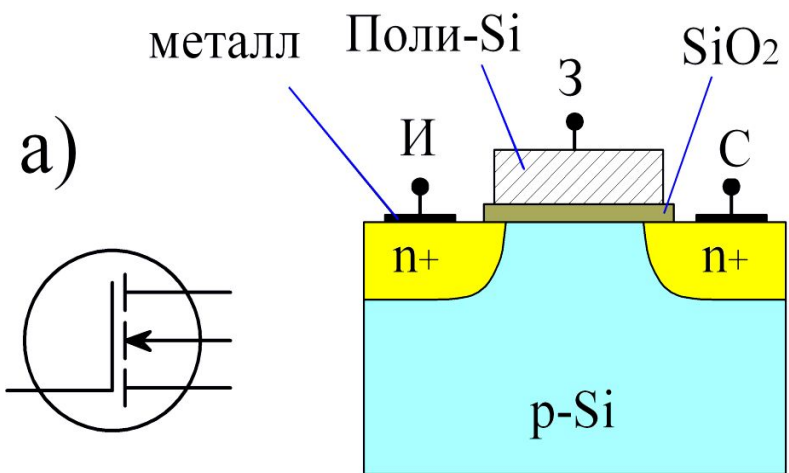
С индуцированным каналом



Со **встроенным** каналом



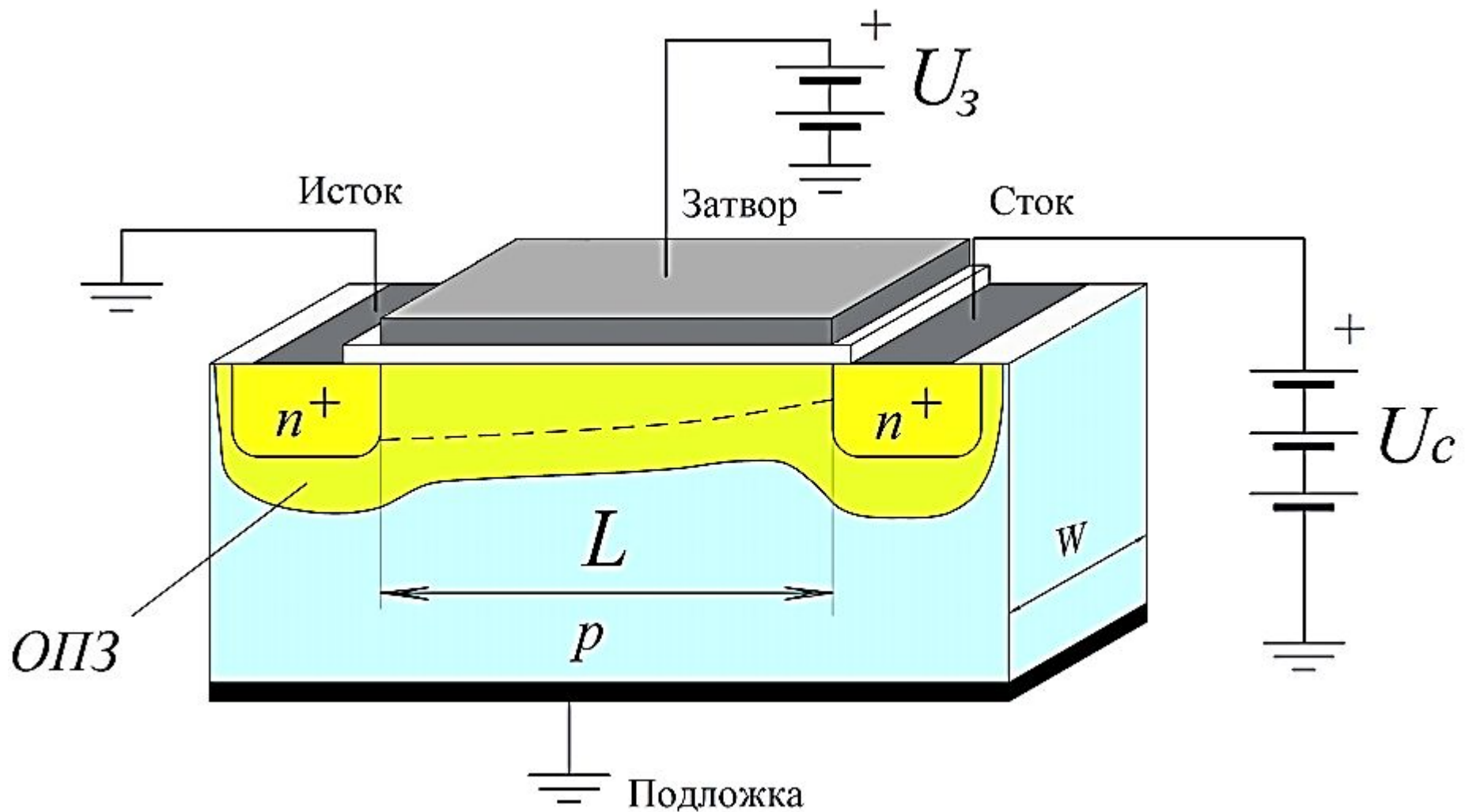
СТРУКТУРЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ



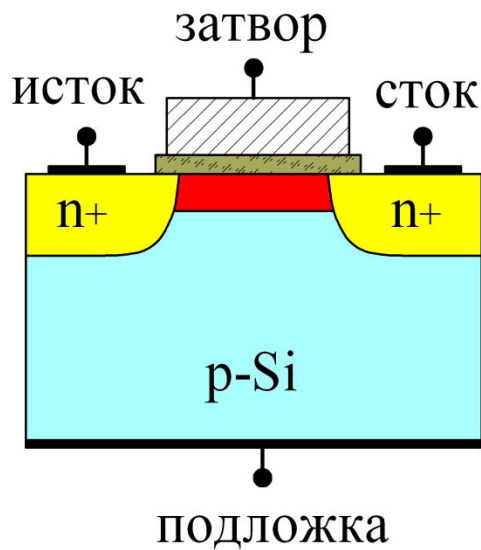
а, б – с индуцированным каналом

в, г – со встроенным каналом

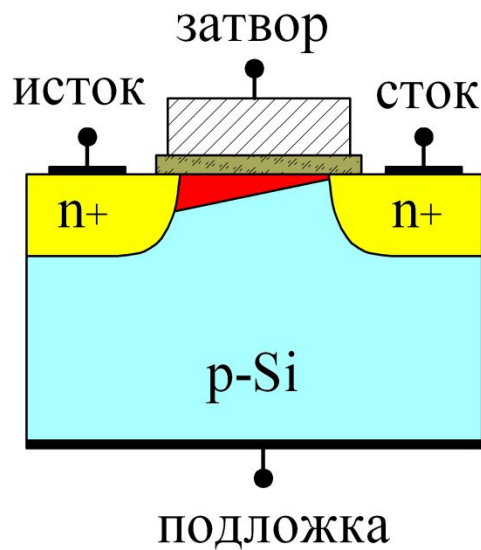
МДП-транзистор с индуцированным n -каналом



ЗАКРЫТИЕ КАНАЛА

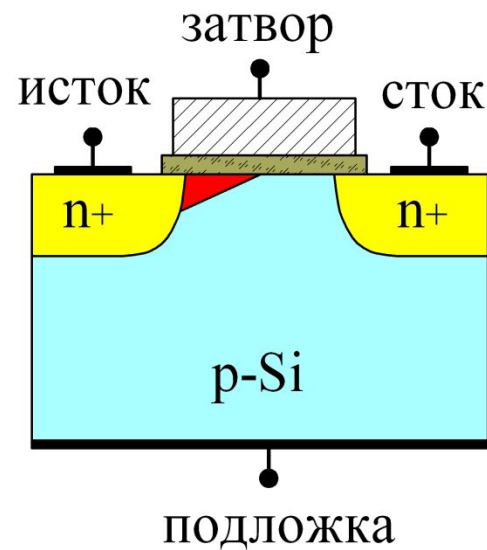


$$U_{си} = 0$$



$$U_{си} > 0$$

$$U_{зи} > U_{пор}$$



$$U_{си} > U_{нас}$$

Сделаем следующие основные допущения:

- одномерное приближение, т.е. концентрации НЗ 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 НЗ в канале μ_s постоянна.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК МДП-ТРАНЗИСТОРА

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

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

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

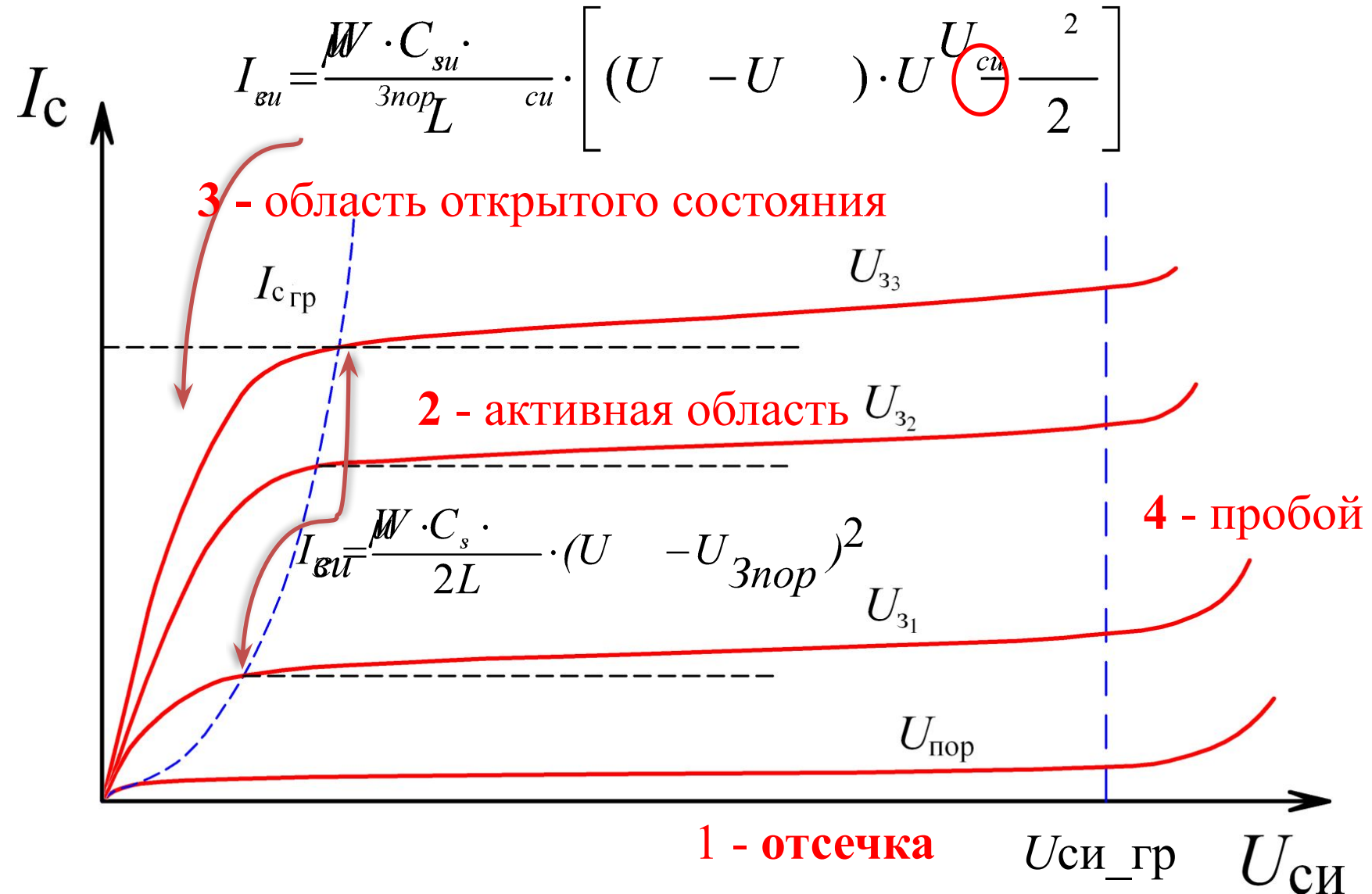
$$\sigma_c = \mu_s \cdot C_3 \cdot [U_3 - U_{пор} - U(x)]$$

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

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

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

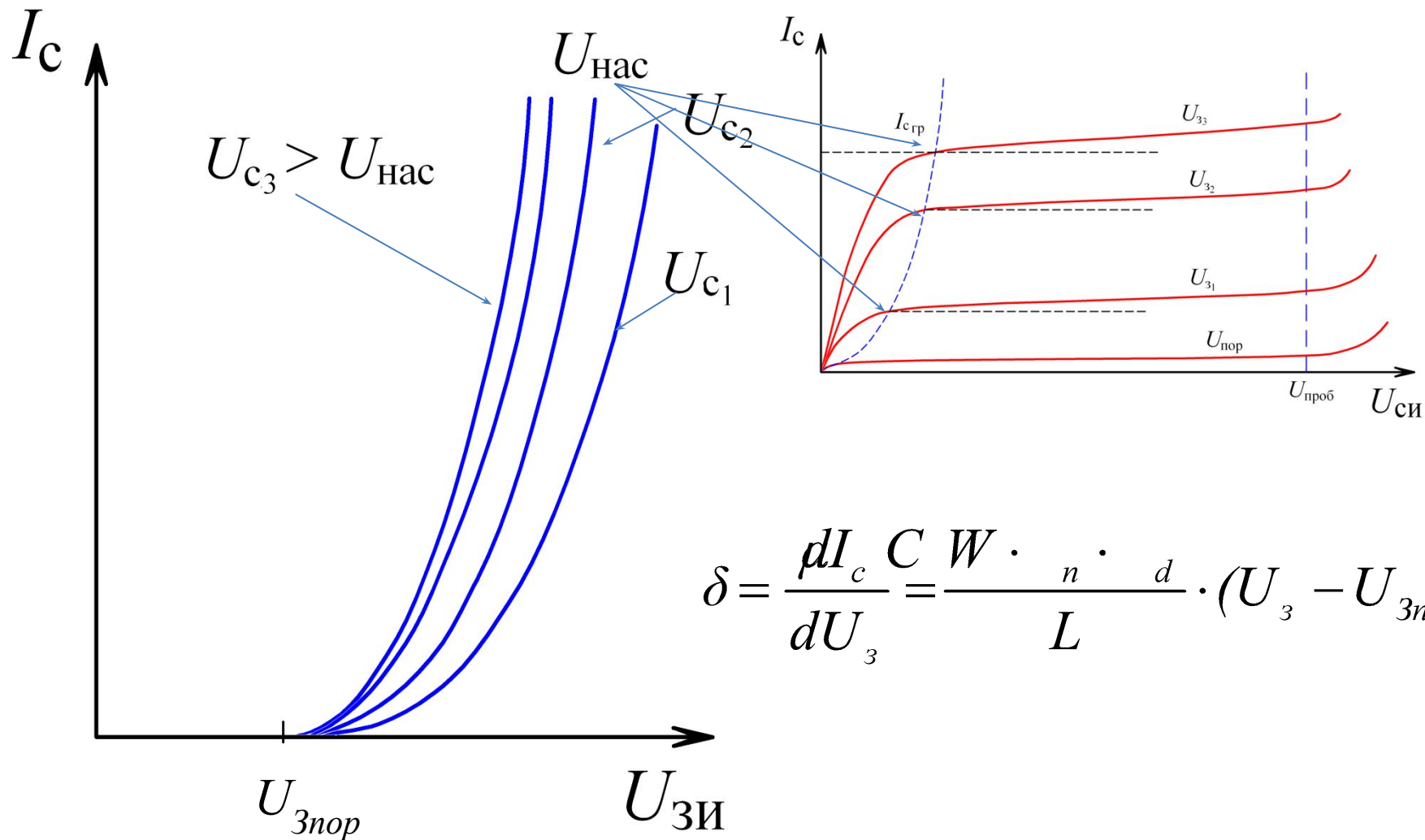
ВЫХОДНАЯ ВАХ МДП-ТРАНЗИСТОРА С ИНДУЦИРОВАННЫМ КАНАЛОМ



три основные рабочие области на выходной характеристике МДП-транзистора

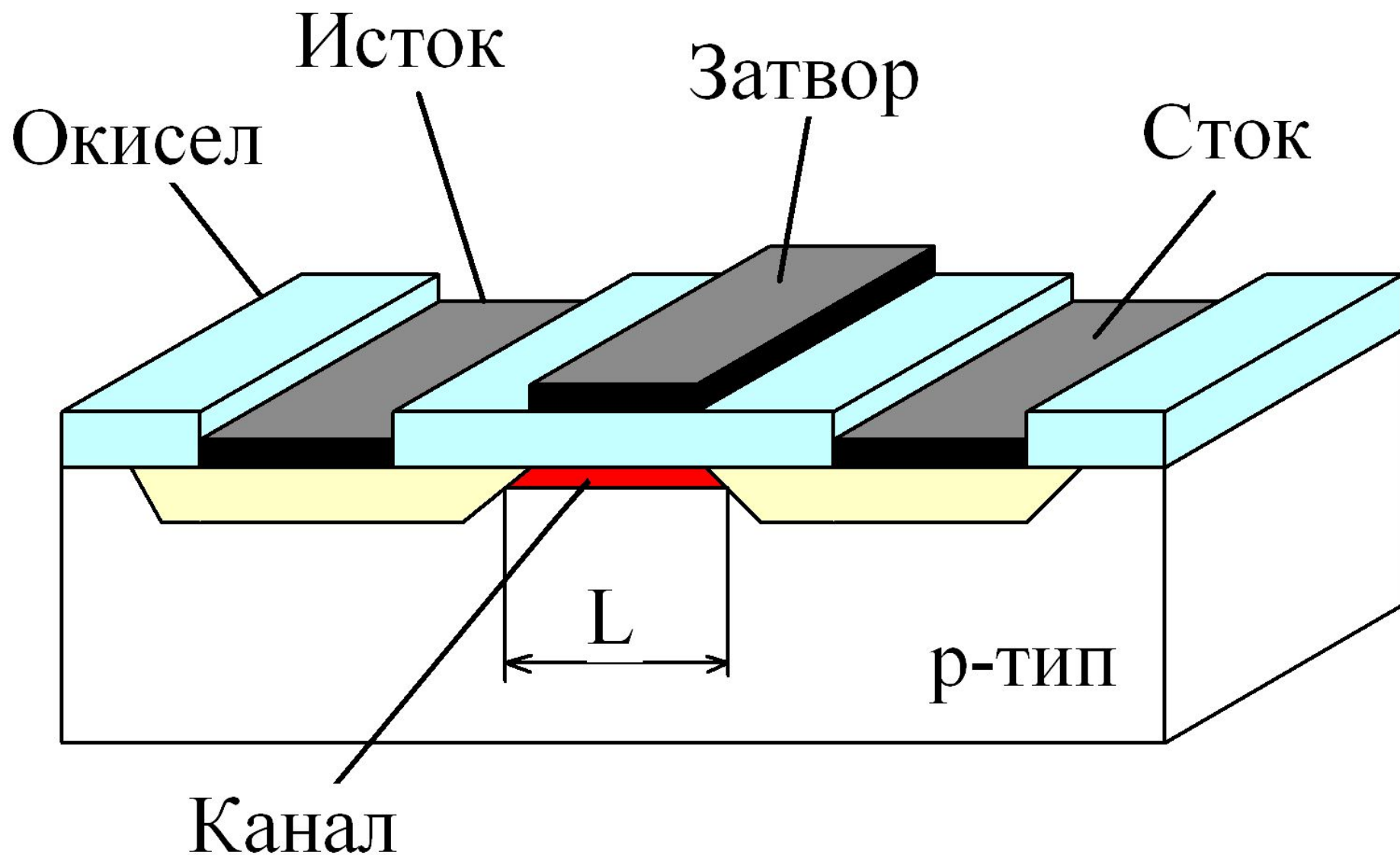
- 1 – область отсечки выходного тока: *транзистор заперт* ($U_{ЗИ} < U_{Зпор}$), в цепи протекает малый обратный ток, обусловленный утечкой и обратным током стокового *pn*-перехода. МДП-транзистор, как и БТ, работает в ключевом режиме.
 - 2 – активная область (пологая часть выходных ВАХ $U_{ЗИ} > U_{Зпор}$, $U_{СИ} < U_{СИ_гр}$) – область, где ток I_C остается практически неизменным с ростом напряжений $U_{СИ}$. МДП-транзистор работает в усилительном режиме.
 - 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 обл. 4 наступают предпробойные явления, сопровождающиеся резким увеличением тока I_C . Обл. пробоя определяет выбор предельно допустимых напряжений $U_{СИ_гр}$

ПЕРЕДАТОЧНАЯ Х-КА МДП-ТРАНЗИСТОРА С ИНДУЦИРОВАННЫМ КАНАЛОМ

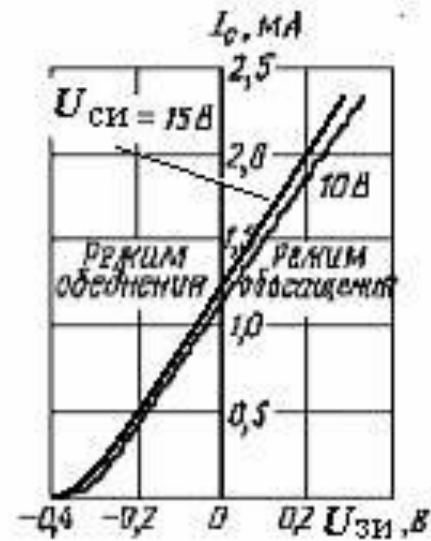
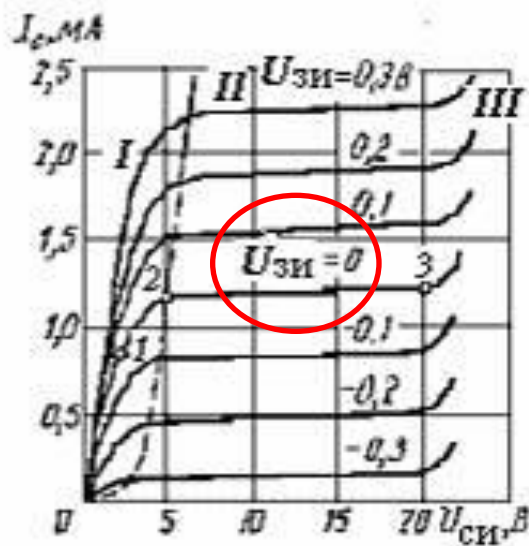
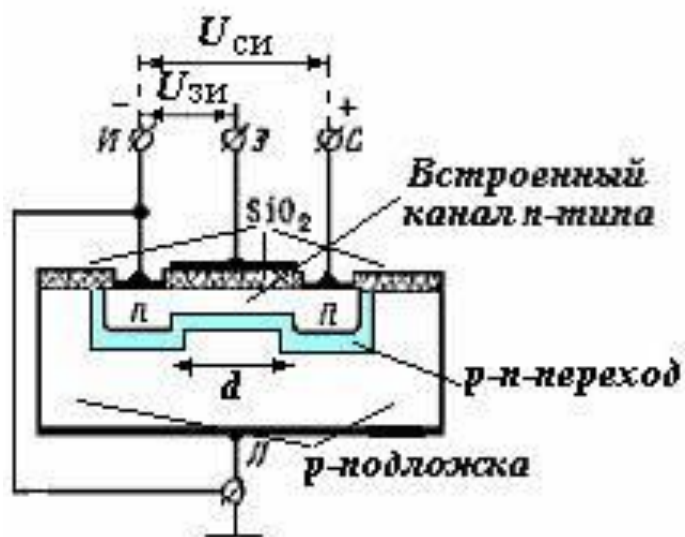


$$\delta = \frac{\mu I_c}{d U_3} C = \frac{W \cdot n \cdot d}{L} \cdot (U_3 - U_{3пор})$$

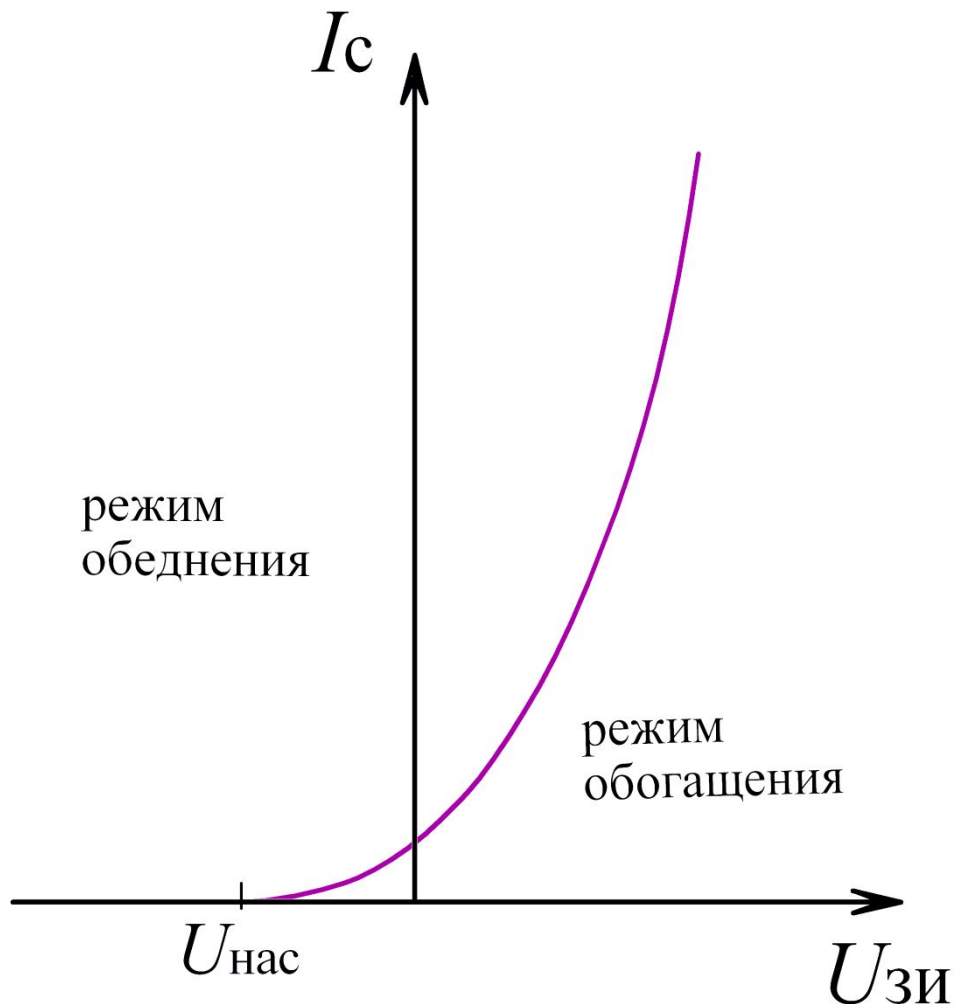
МДП-ТРАНЗИСТОР СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ



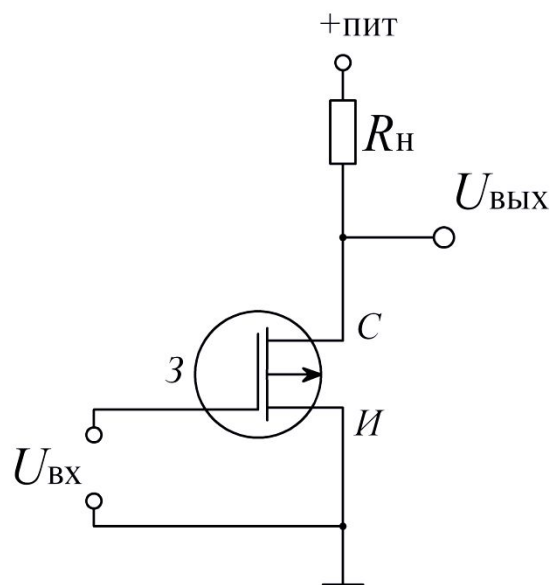
МДП-ТРАНЗИСТОР СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ



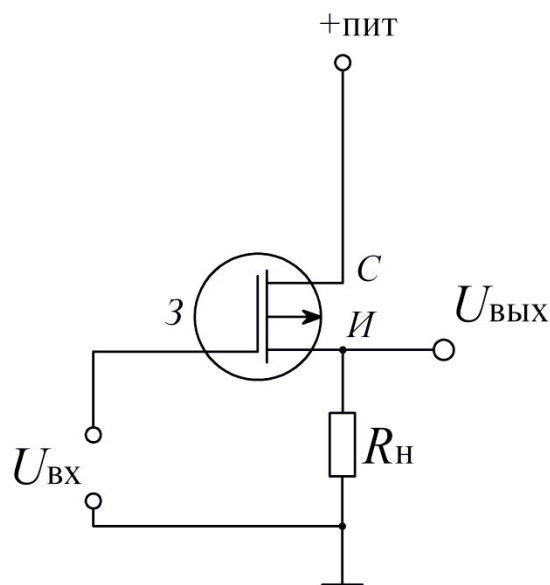
ПЕРЕДАТОЧНАЯ Х-КА МДП- ТРАНЗИСТОРА СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ



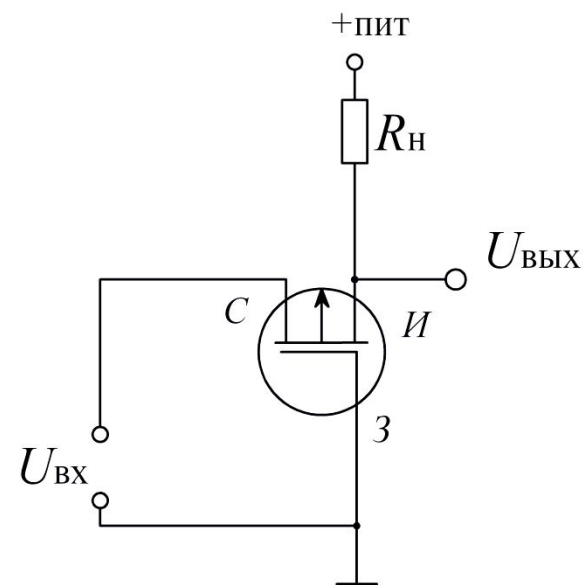
ВАРИАНТЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА



а) Общий исток



б) Общий сток



в) Общий затвор

Преимущества МДП-транзисторов по сравнению с БТ

- Высокое r_{ex} , 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 ПТ в отличие от БТ участвуют только ОНЗ.
- Относительная простота изготовления.

СИЛОВЫЕ ПРИБОРЫ

История развития, вклад российских ученых

До 70-х годов XX века в качестве силовых п/п-ковых приборов, помимо тиристора, использовались **БТ**. Их эффективность была ограничена несколькими недостатками:

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

С появлением *ПТ* в 80-х годах, выполненных по технологии МОП, ситуация изменилась. В отличие от БТ, ПТ:

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 ПТ 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 БТ с помощью ПТ с изолированным затвором. Было показано, что выходные токи и напряжения составных структур определяются БТ, а входные – ПТ. 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 диоде (транзисторе).

Управляющий электрод называется **затвором**, как у ПТ, два других электрода – Э и К, как у БТ.

Прибор введён в силовую цепь выводами БТ Е (эмиттер) и С (коллектор), а в цепь управления – выводом G (затвор).

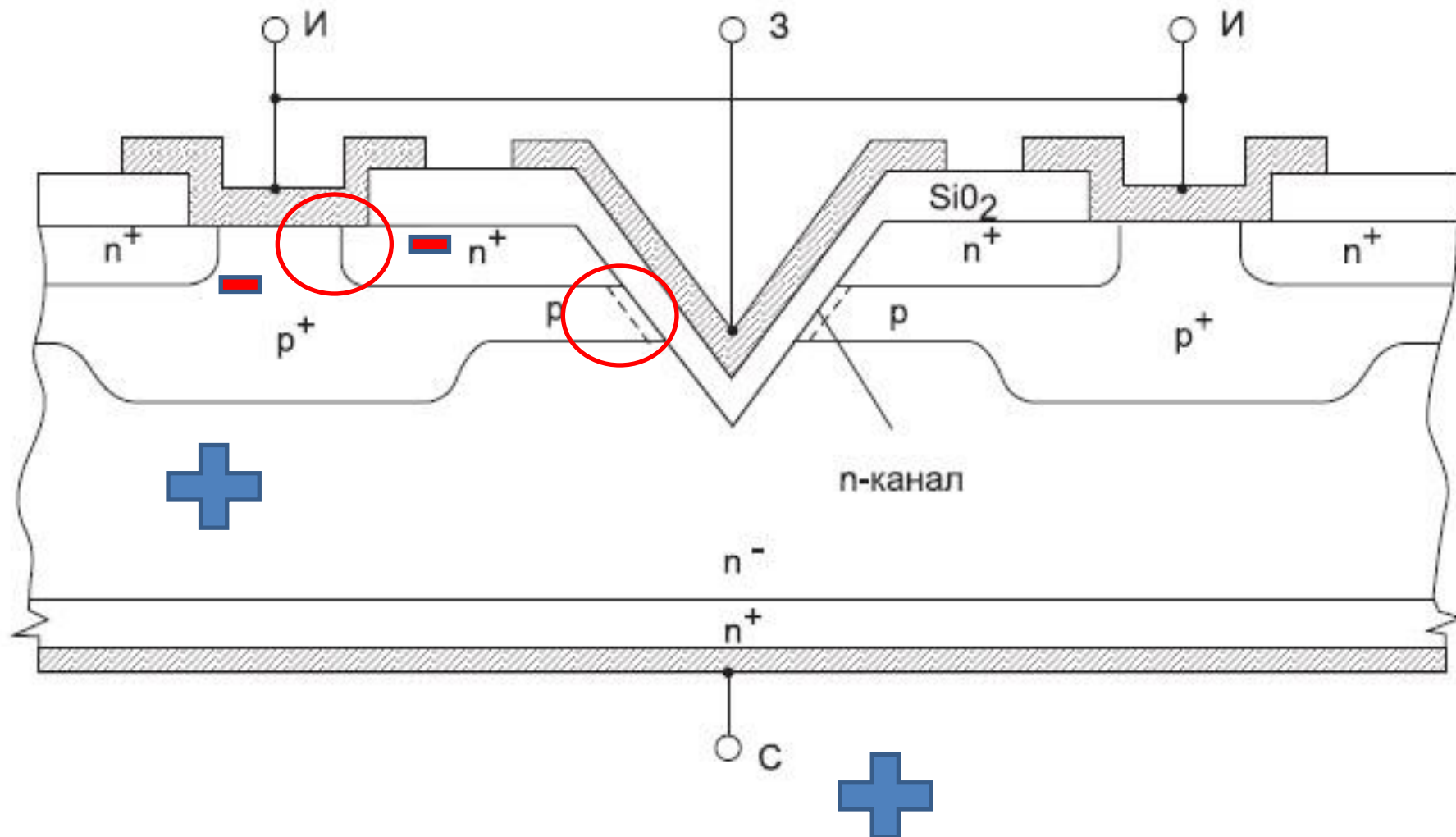
Такое составное включение ПТ и БТ позволяет сочетать в одном устройстве достоинства обоих типов п/п-ковых приборов.

БТИЗ сочетает **достоинства** двух основных видов транзисторов: высокое входное сопротивление, низкий уровень управляющей мощности – от ПТ с изолированным затвором; низкое значение остаточного напряжения во включенном состоянии – от БТ.

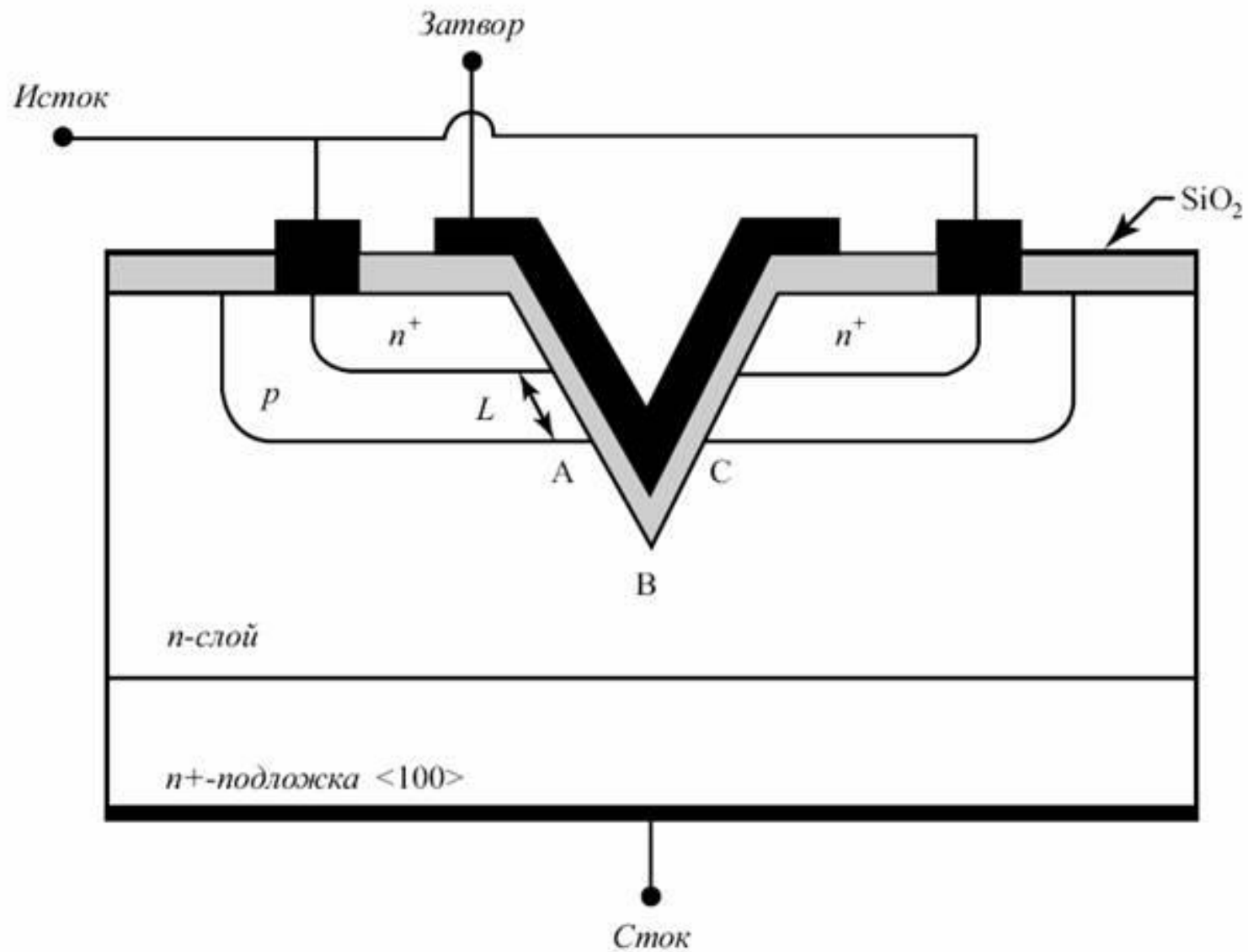
Горизонтальная структура первых советских мощных МДП-транзисторов



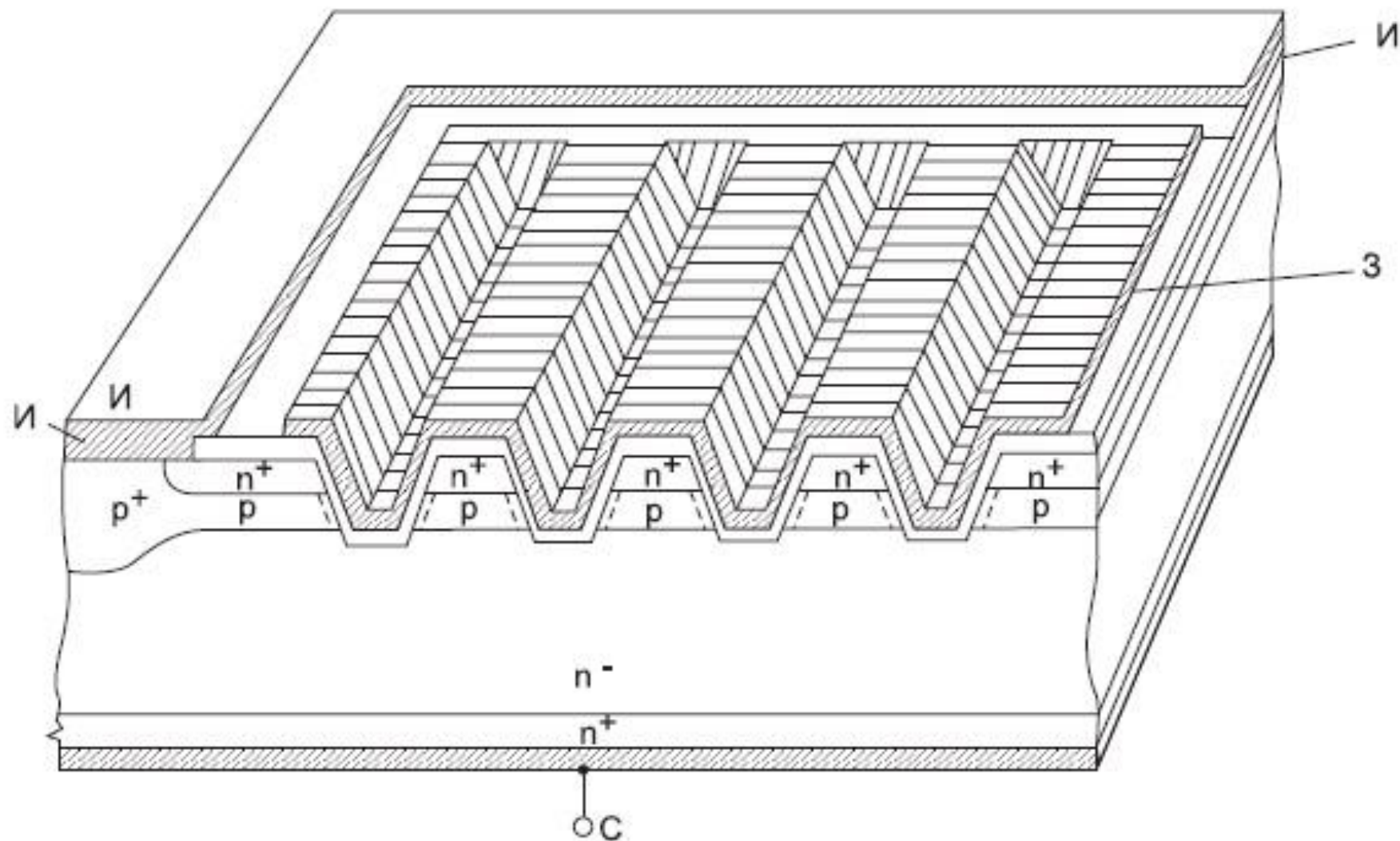
МДП- транзистор с V-образной структурой



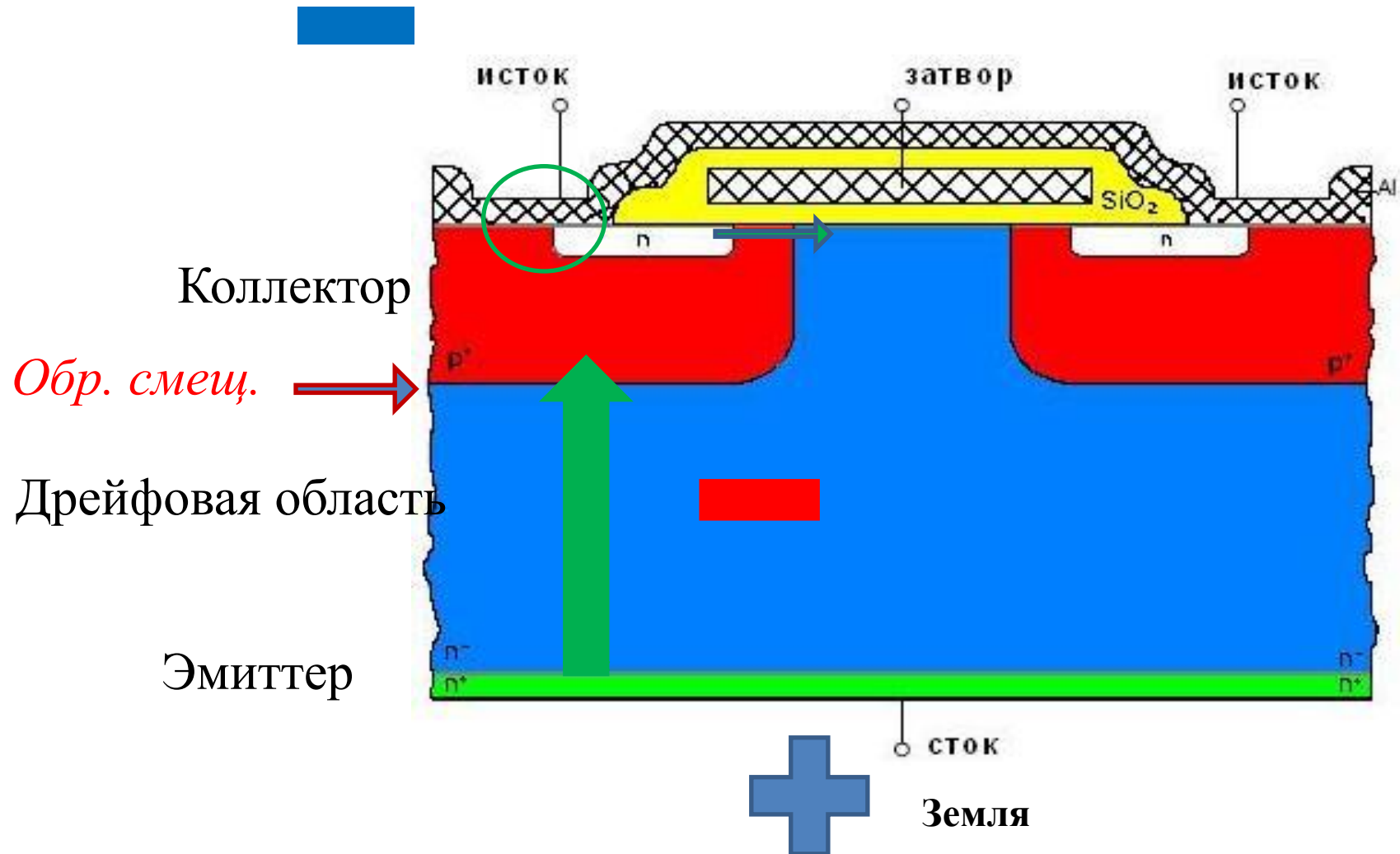
Структура V-MOП



МДП- транзистор с U -образной структурой



Силовой MOSFET. Структура D-MOП



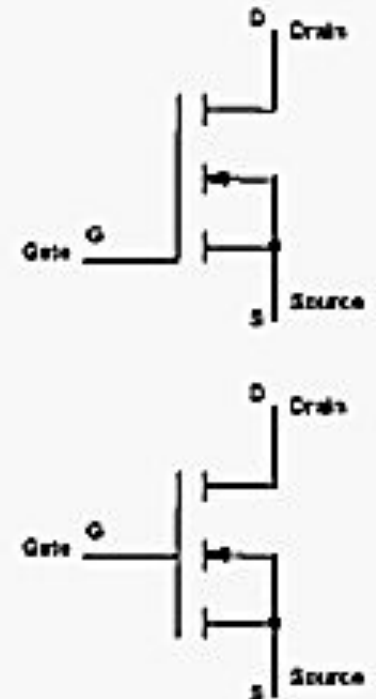
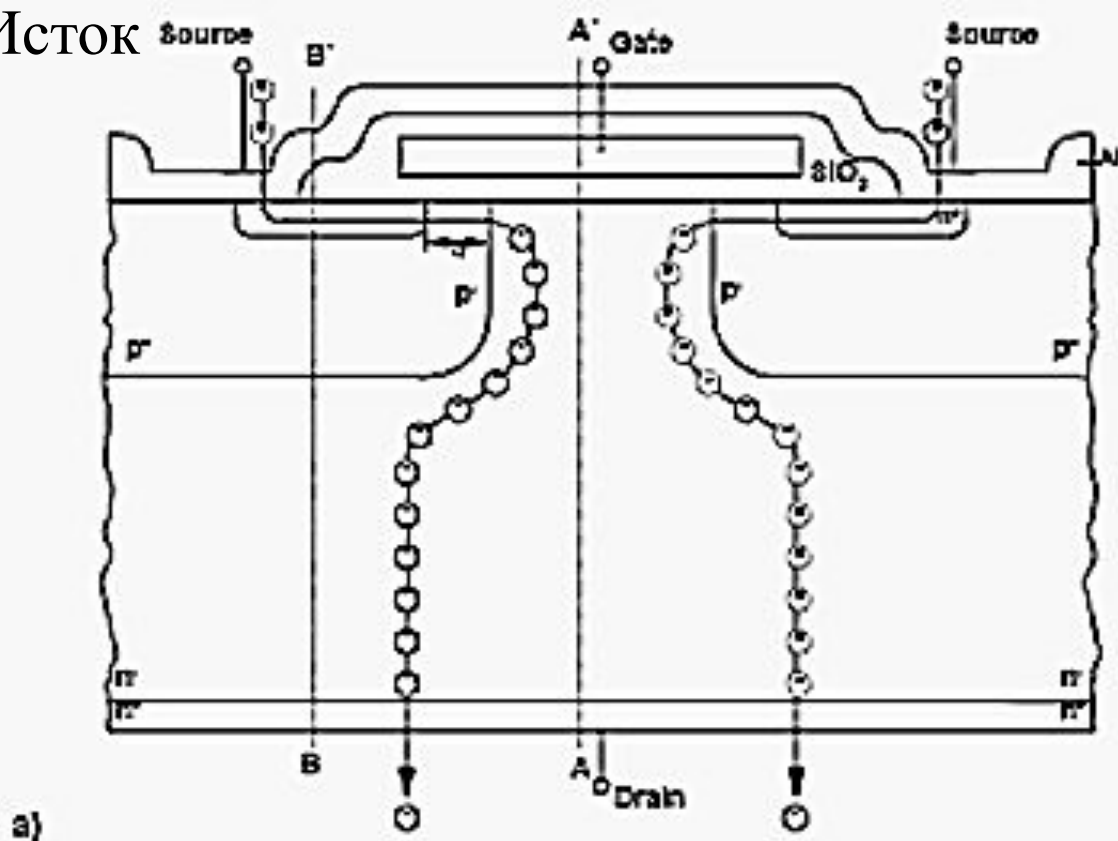
p -коллектор соединен накоротко с истоком, положительное напряжение стока смещает переход p -коллектор – n -дрейфовая область в **обратном направлении**. Обедненный слой расширяется главным образом в n -дрейфовую область, потому что p -коллектор имеет более высокий уровень легирования. Для обеспечения более высокого запирающего напряжения стока необходимо уменьшить легирование дрейфовой области и увеличить ее толщину, что приведет к $\uparrow$ сопротивления протеканию тока в открытом состоянии.

Это сопротивление определяется последовательным сопротивлением канала и дрейфовой области.

Силовой MOSFET

ВО ВКЛЮЧЕННОМ СОСТОЯНИИ

Исток



a)

b)

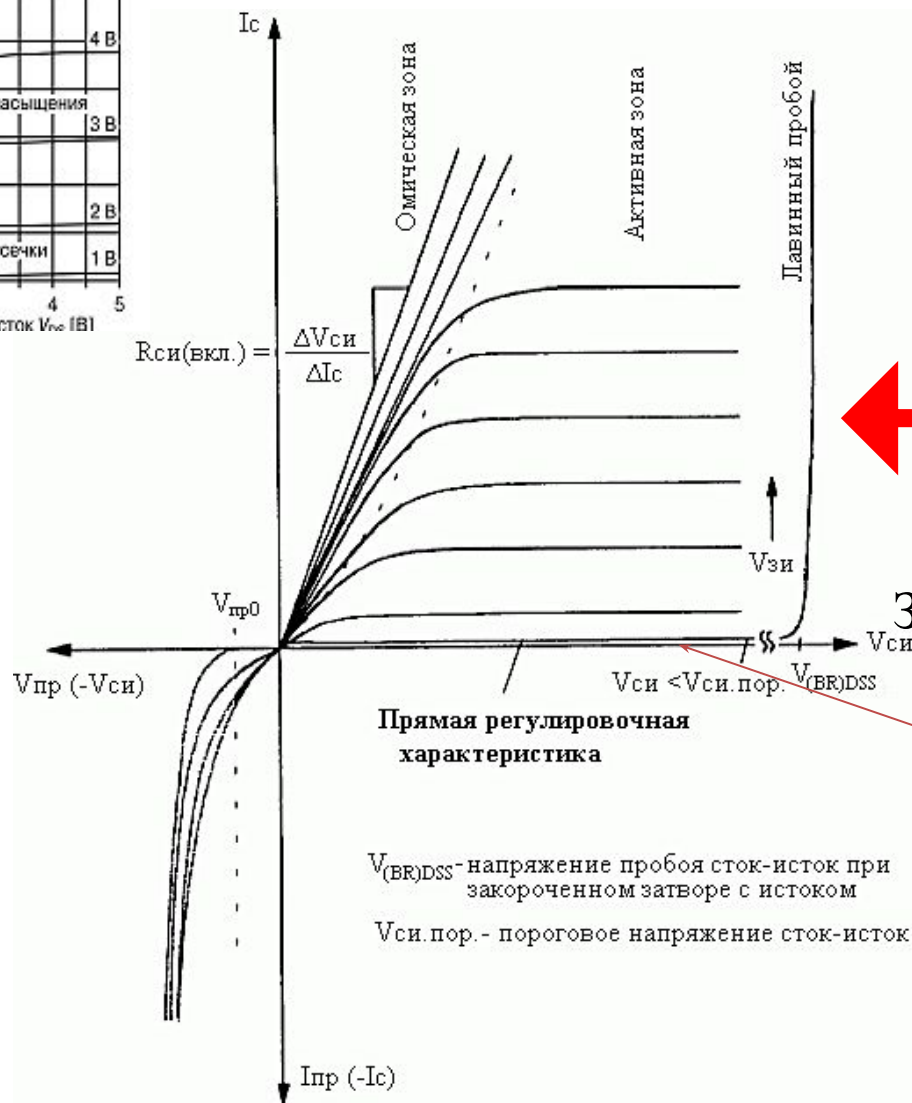
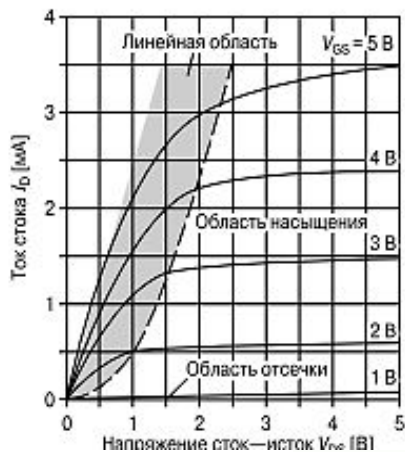


Сток

Земля

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

Основная выходная характеристика силового транзисторного модуля



Насыщение,
активная зона ВАХ

Закрытое состояние

I_{DSS}

Прямая регулировочная
характеристика

$V_{(BR)DSS}$ - напряжение пробоя сток-исток при
закороченном затворе с истоком

$V_{си.пор.}$ - пороговое напряжение сток-исток

При прямом смещении (I квадрант)

Закрытое состояние

При $V_{\text{СИ(пор)}} > V_{\text{СИ}} > 0$ между стоком и истоком будет протекать только очень малый ток I_{DSS} . I_{DSS} будет расти очень медленно с ростом $V_{\text{СИ}}$. По достижении определенного установленного значения напряжения сток-исток $V_{(\text{BR})\text{DSS}}$, происходит лавинный пробой перехода p^+ ячейка/ n^- дрейфовая зона/ n^+ эпитаксиальный слой.

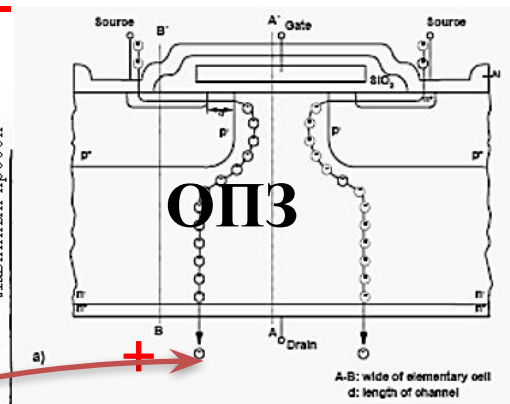
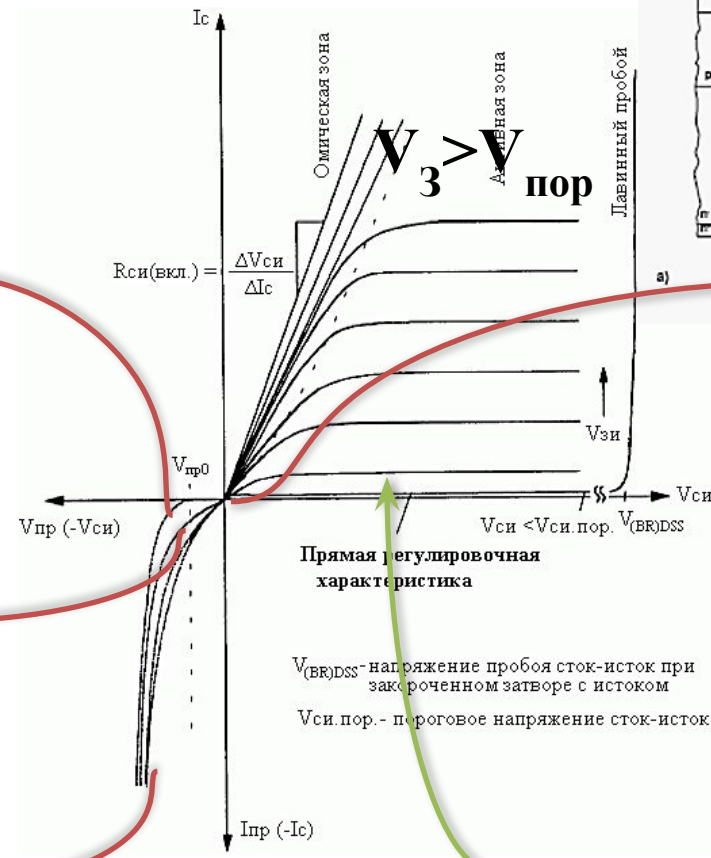
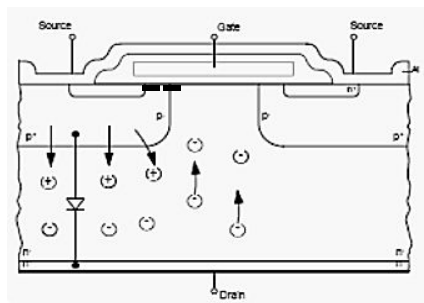
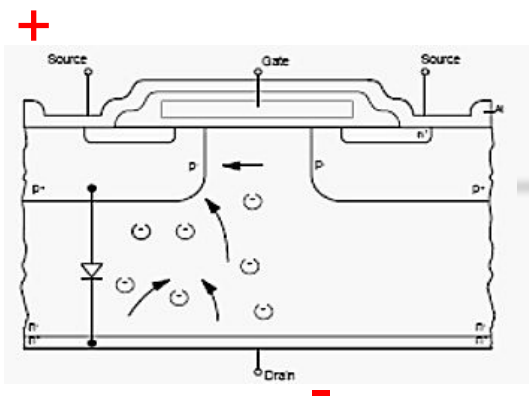
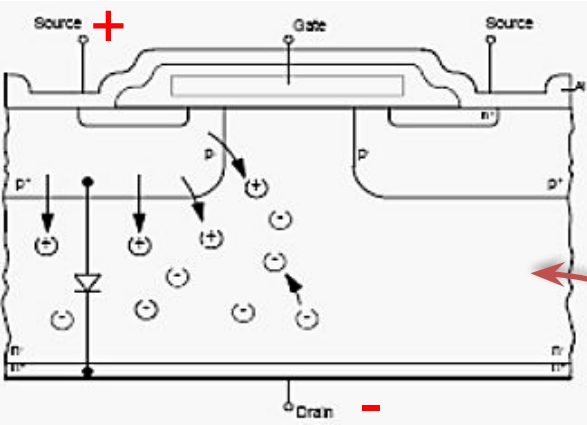
Увеличенный ток, созданный лавинным пробоем диода коллектор-база, может привести к разрушению МДП ПТ.

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.

Включенное состояние

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

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



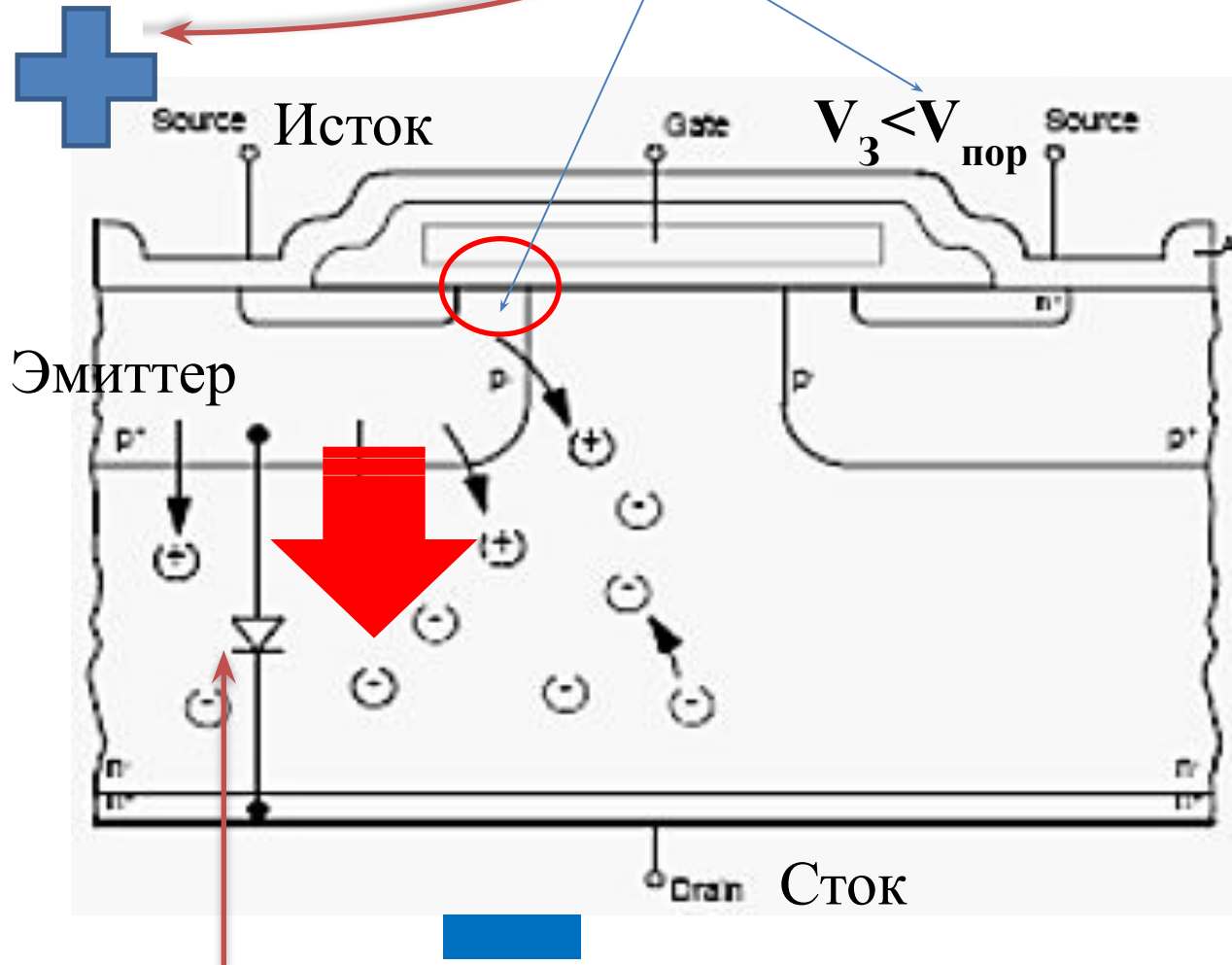
$V_3 > V_{пор}$

$V_3 < V_{пор}$

Работа при обратном напряжении

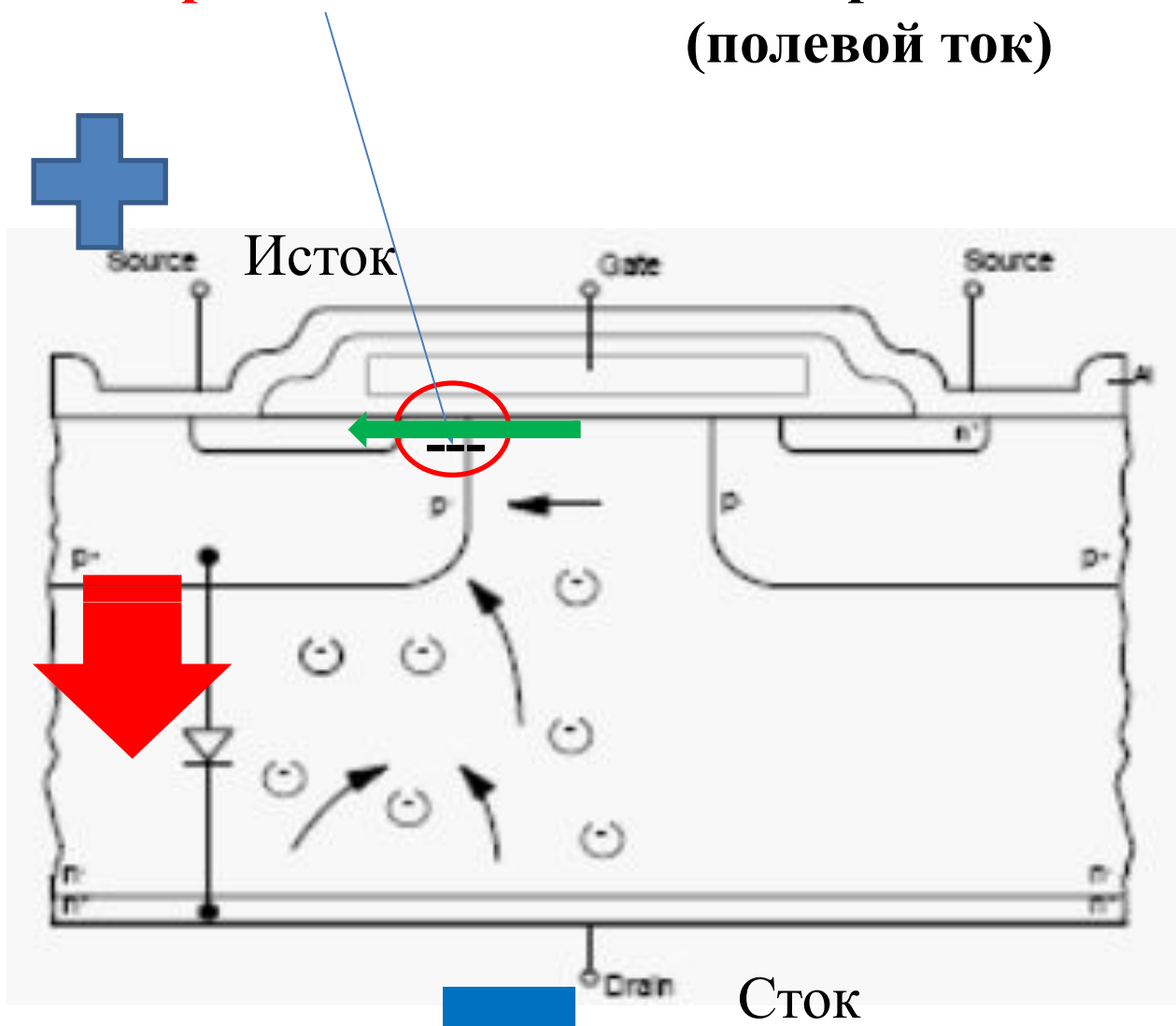
При обратном напряжении (III квадрант) характеристика МДП ПТ эквивалентна диодной при $V_{зс} < V_{зс(пор)}$. Это происходит из-за паразитного диода в МДП ПТ

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



паразитный диод

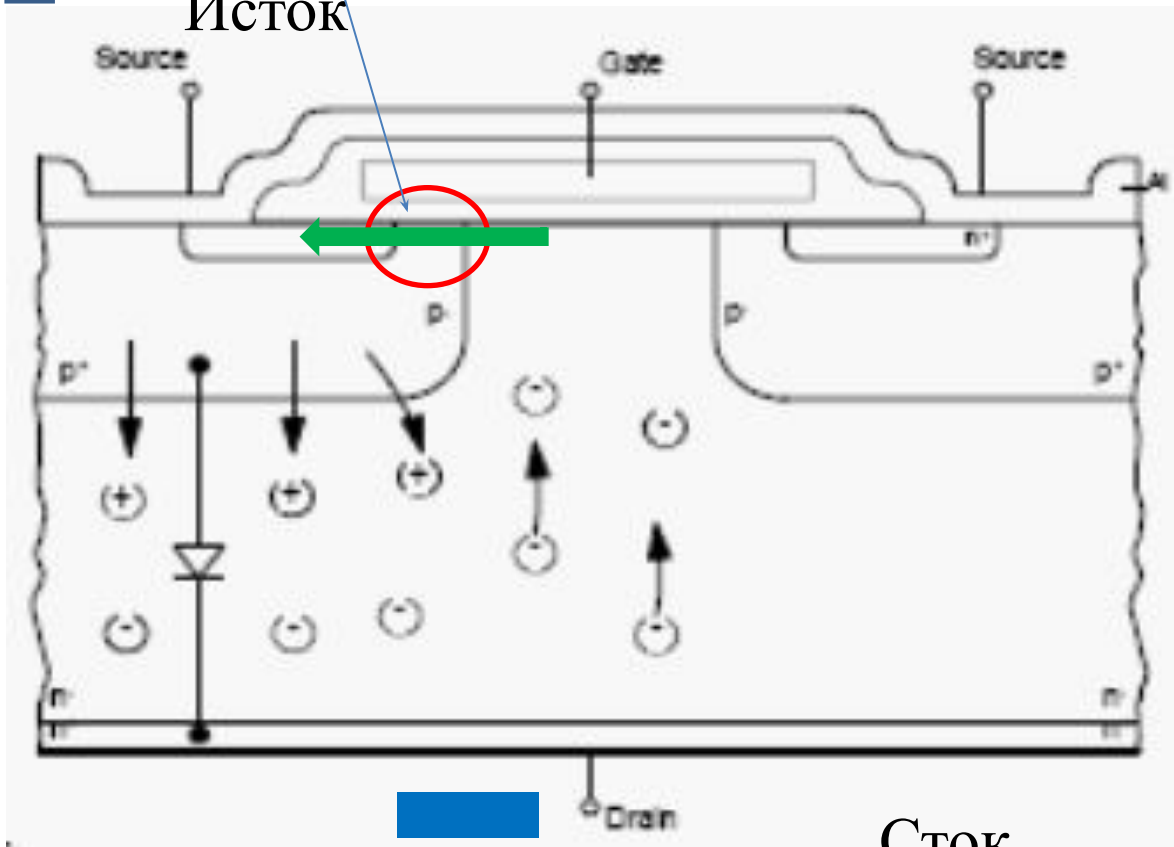
Работа при обратном напряжении силового МДП ПТ **открытый канал** и малое отрицательное напряжение $V_{си}$ (полевой ток)



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

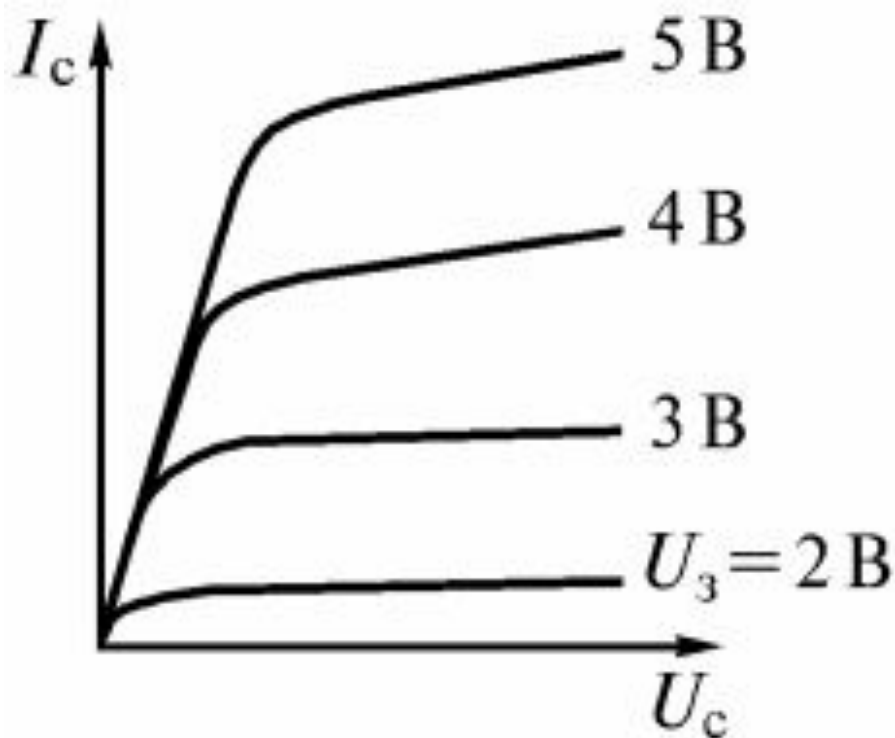


Исток

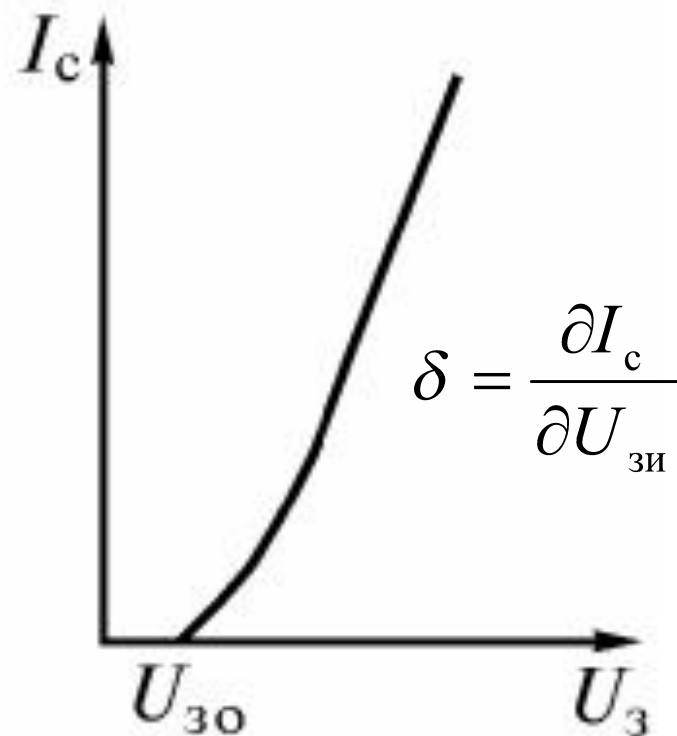


Сток

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



а)

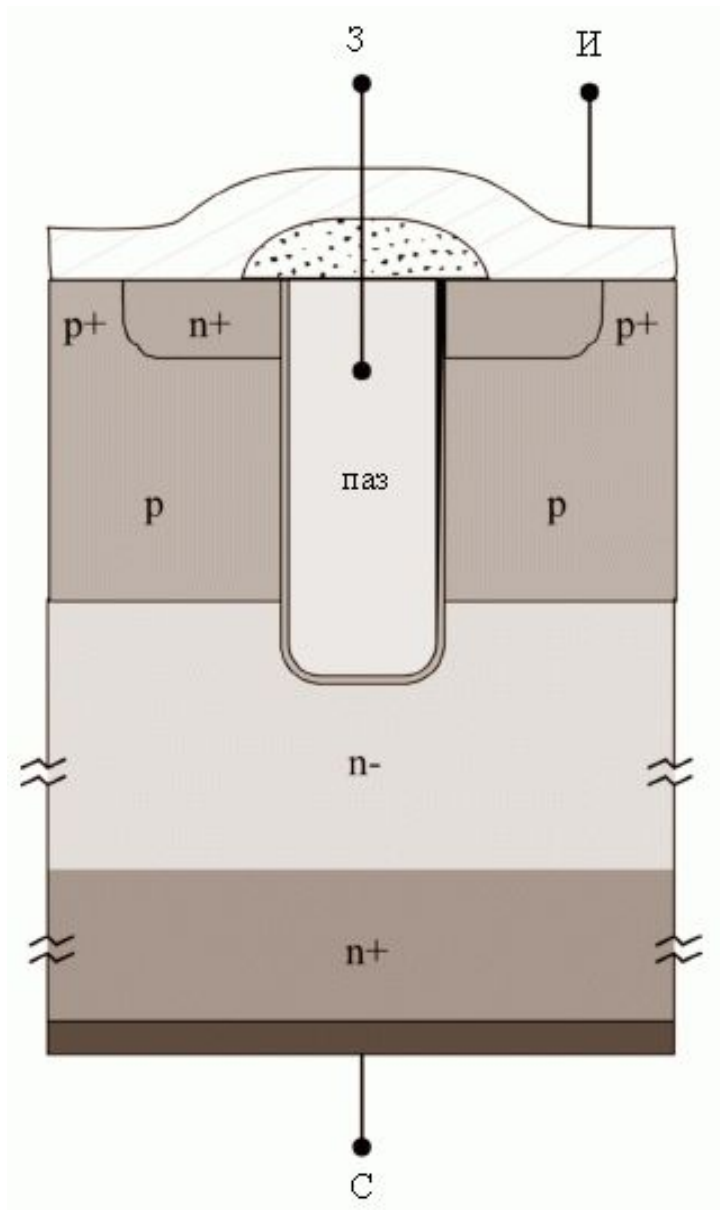


б)

$$\delta = \frac{\partial I_c}{\partial U_{3и}}$$

Чтобы перевести МОП-транзистор в закрытое состояние необходимо $\downarrow V_{зс}$, е-ны перестают индуцироваться в канале, путь от истока к стоку (ток от стока к истоку) пропадает. В отличие от БТ при переключении не требуется времени на рассасывание ННЗ, поэтому можно получить время выключения 10...100 нс (надо разрядить входную емкость затвора тр-тора).

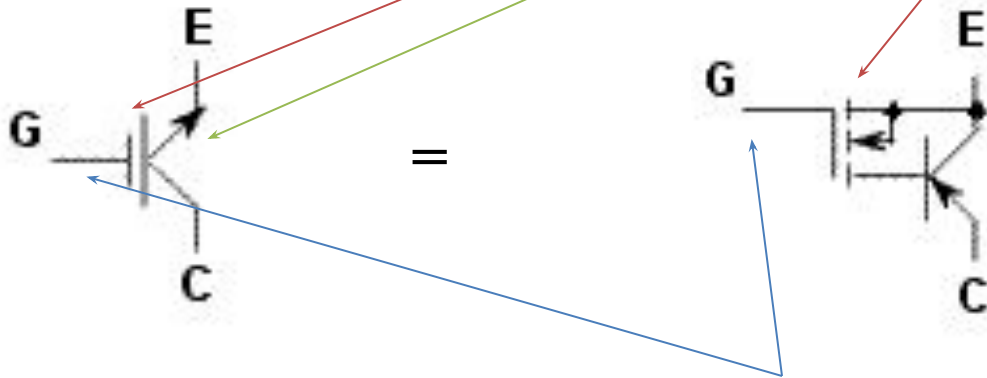
Структура U-образного МОП-транзистора



Устройство и особенности работы IGBT

По своей внутренней структуре БТИЗ представляет собой каскадное включение двух электронных ключей: входной ключ на **ПТ** управляет мощным оконечным ключом на **БТ**.

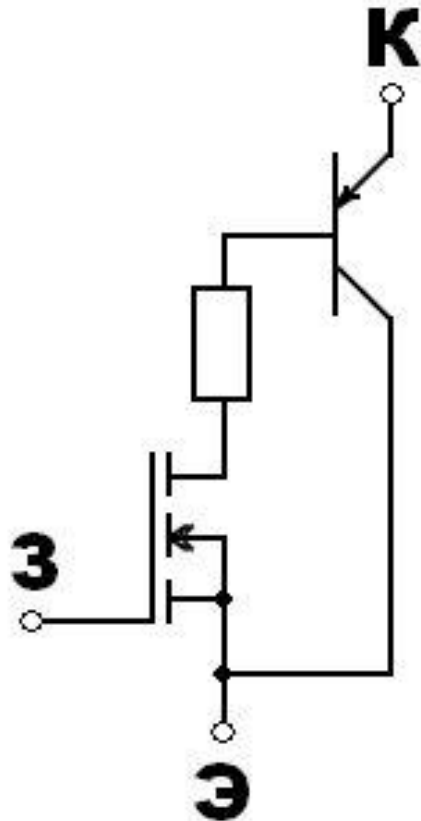
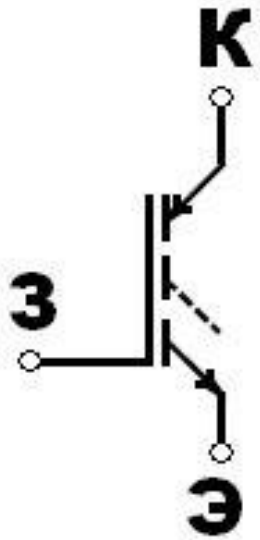
Схематичное изображение внутренней структуры БТИЗ



Управляющий электрод называется **затвором**, как у ПТ, два других электрода – **эмиттером** и **коллектором**, как у БТ.

Прибор введён в силовую цепь выводами БТ **Е** (эмиттер) и **С** (коллектор), а в цепь управления – выводом **Г** (затвор).

IGBT –



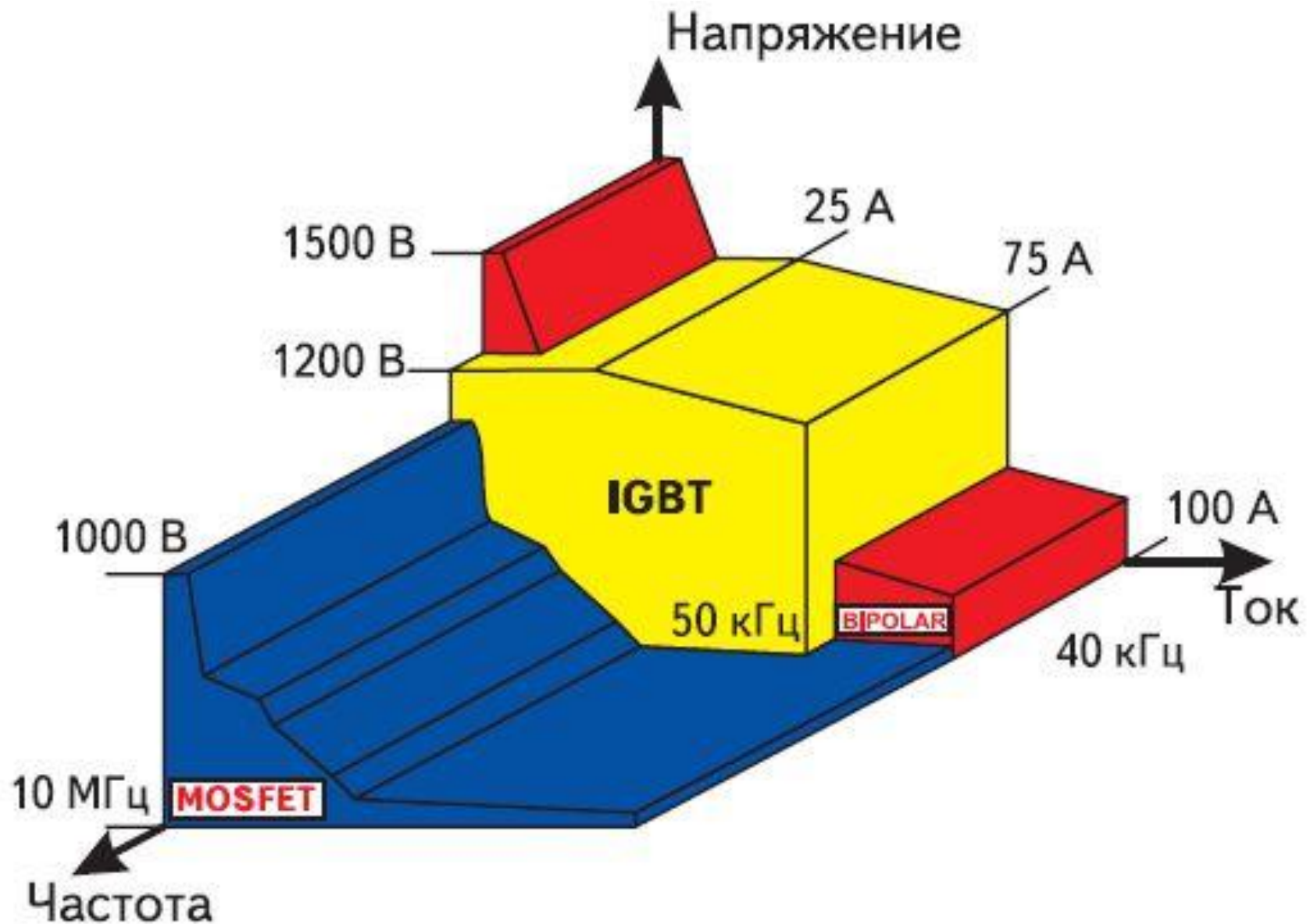
полностью управляемый п/п-ковый прибор, в основе которого трехслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком.

Для IGBT с номинальным напряжением в диапазоне 600-4000 В в полностью включённом состоянии прямое падение напряжения, так же как и для БТ, 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 БТ (малое падение напряжения в открытом состоянии, высокие коммутируемые напряжения), так и MOSFET-транзисторов (малая мощность управления, высокие скорости коммутации).

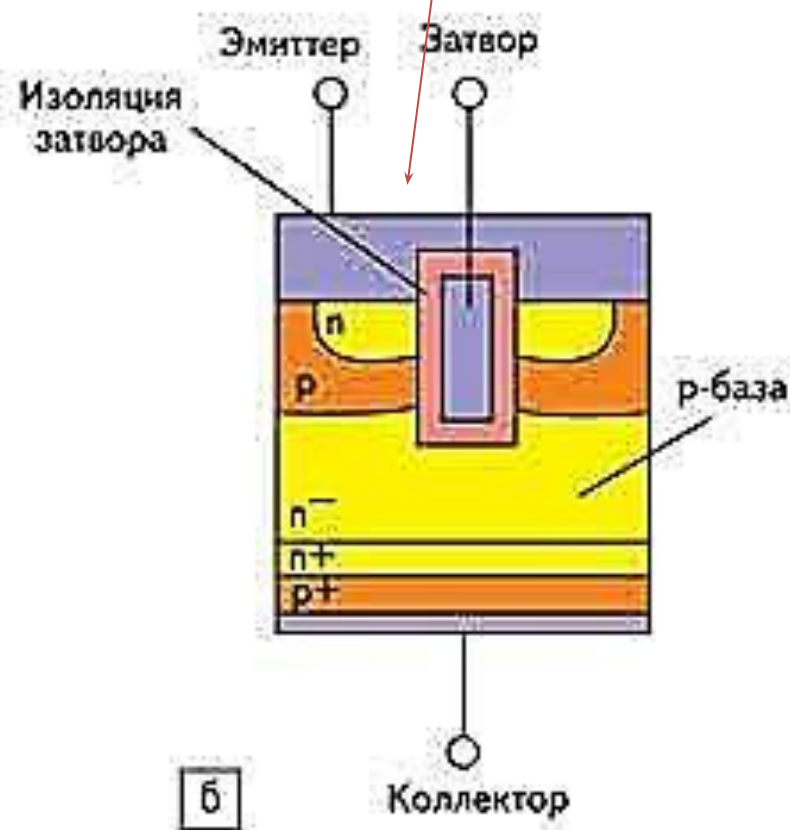
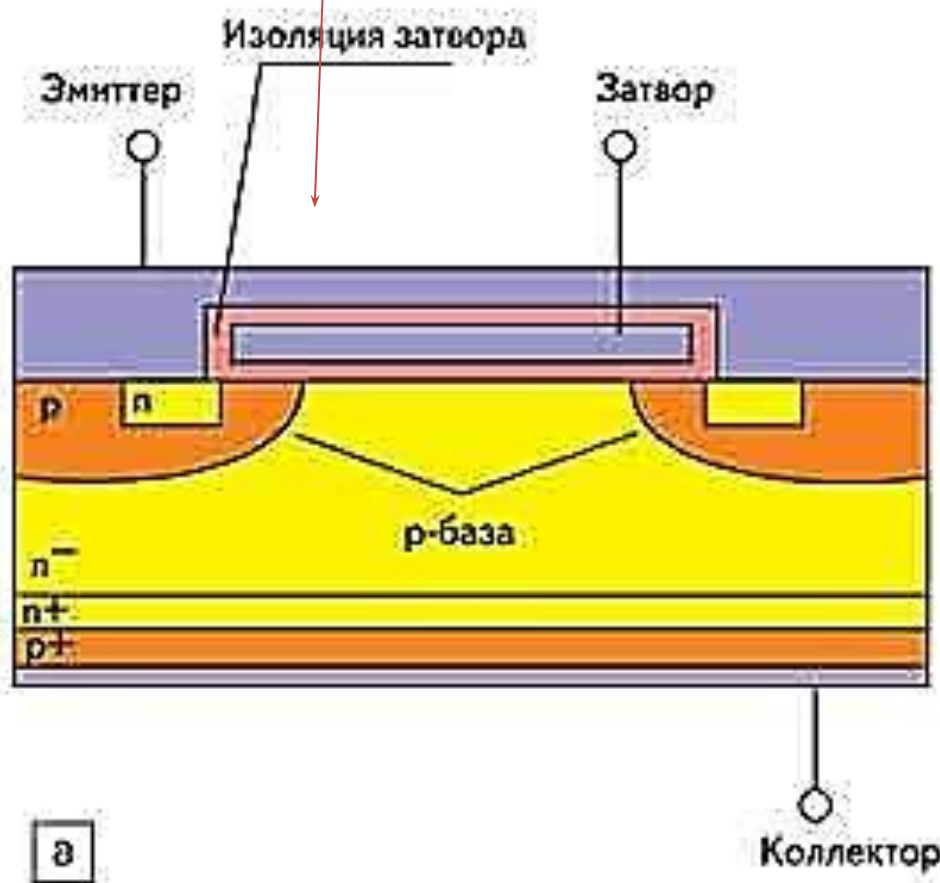
По быстродействию IGBT уступают МДП ПТ, но значительно превосходят БТ. Типичные значения времени рассасывания накопленного заряда и спада тока при выключении IGBT находятся в диапазонах 0,2-0,4 и 0,2-1,5 мкс, соответственно.

Область применения IGBT

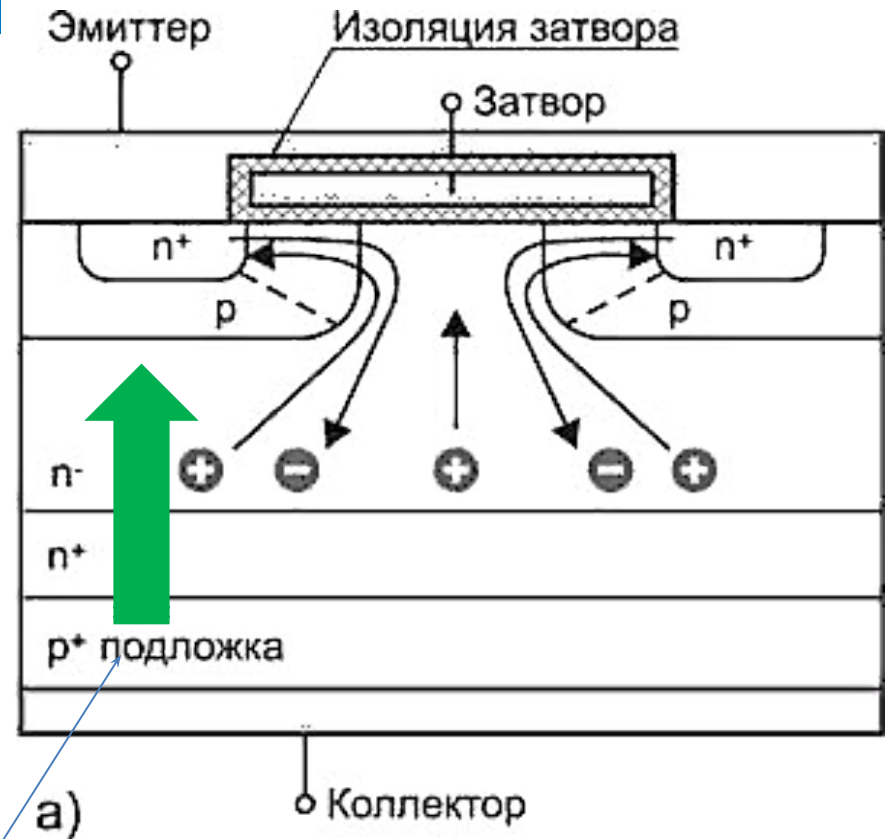
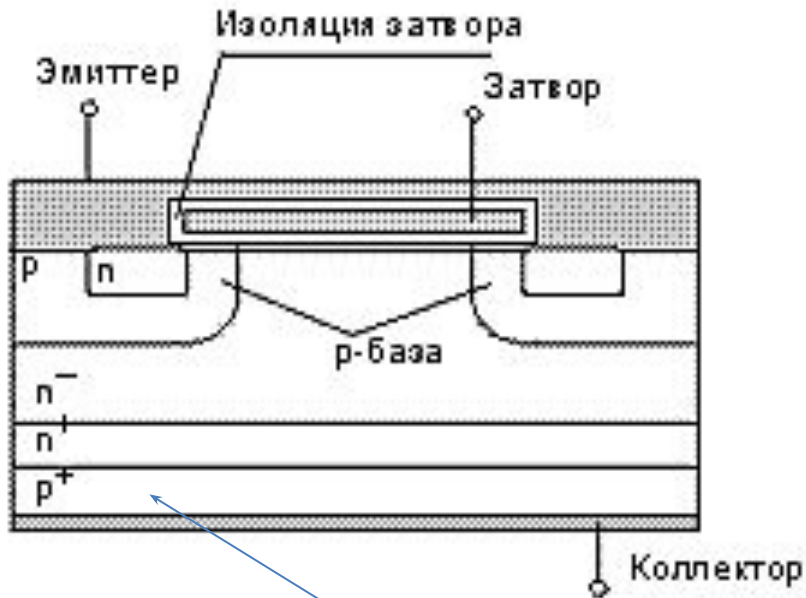


Структуры IGBT

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

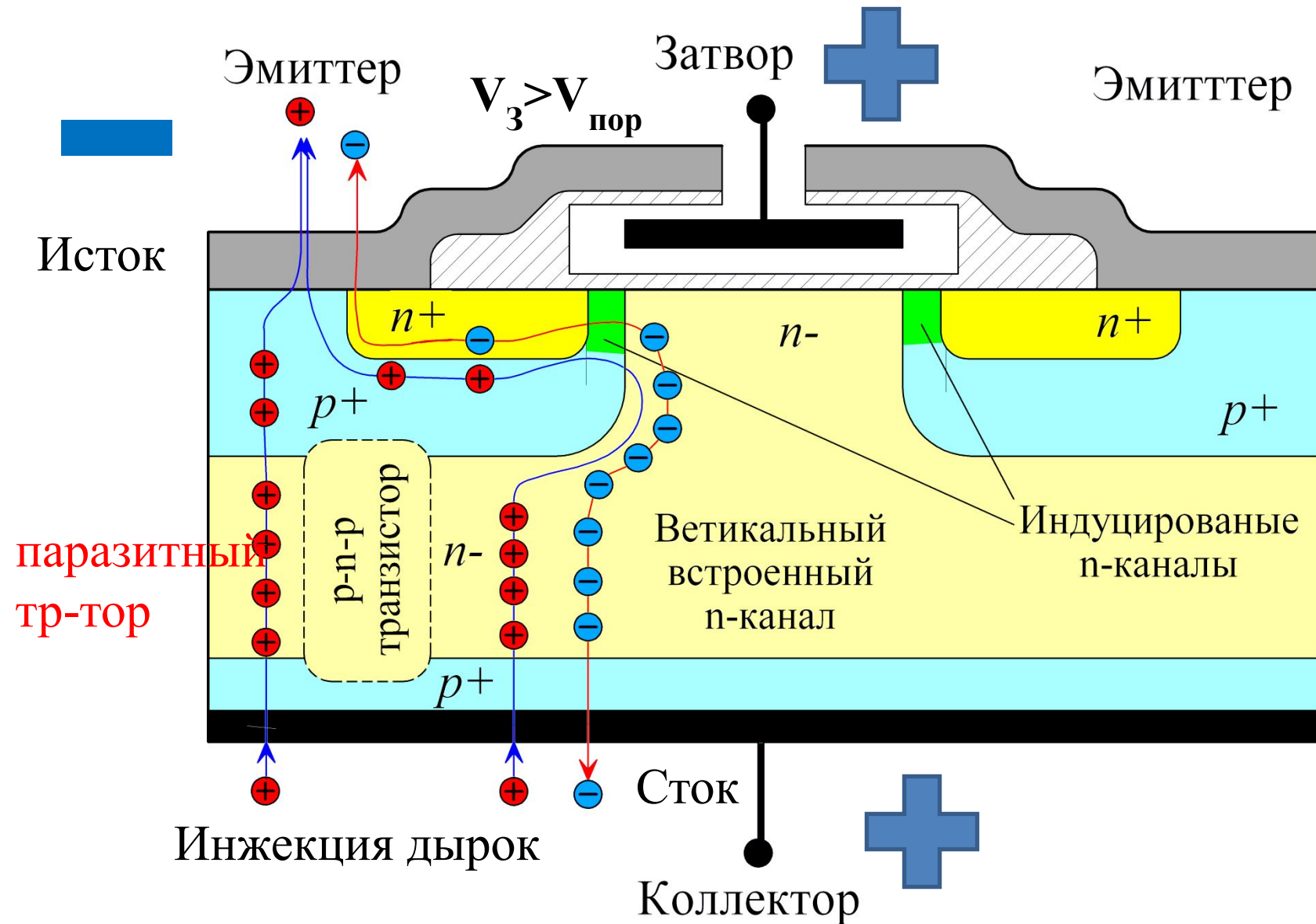


Структура IGBT планарного типа



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

СТРУКТУРА IGBT



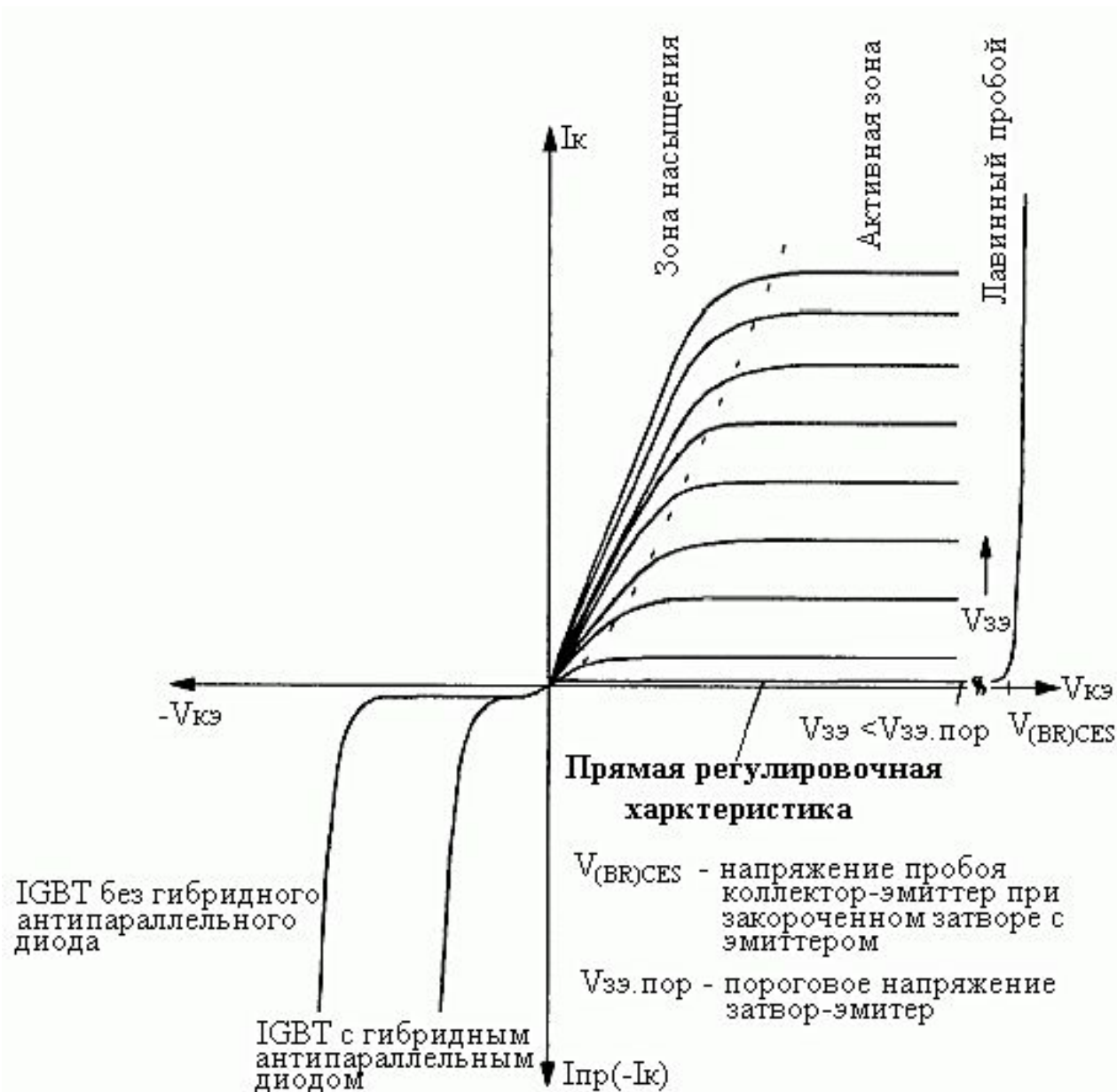
БТ образован слоями p^+ (коллектор), n^- (база), p^+ (эмиттер);

ПТ – слоями n^+ (исток), n^- и затвором.

Затвор имеет вывод, включаемый в цепь управления.

При подаче на изолированный затвор $V_z > V_{пор}$, возникает проводящий канал в p^+ – области и МДП тр-тор **открывается**. Электроны из истока МДП ПТ по каналу поступают в стоковую область МДП ПТ (дрейфовая область). Эта область является n^- –базой p - n - p тр-ра. Поступающие е-ны понижают потенциальный барьер нижнего прямосмещенного КП, что приводит к инжекции дырок из p^+ –коллектора p - n - p тр-тора в область n^- –базы, обеспечивая открытие БТ p - n - p . Верхний ЭП всегда находится при **обратном смещении**, поэтому p - n - p тр-тор не попадает **в режим насыщения**. Между внешними выводами ячейки – К и Э начинает протекать ток. При этом ток стока МДП тр-тора оказывается усиленным в $(\beta+1)$ раз.

ВАХ IGBT



ТОК ОТСЕЧКИ

При превышении определенного максимального напряжения К-Э $V_{(BR)CES}$, 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 $V_{KE} > 0$ 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 :

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

Значение крутизны для IGBT является более высоким в сравнении с биполярными и МДП транзисторами.

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). Для хорошо запираемых IGBT напряжение насыщения намного меньше, чем напряжение, требуемое для включения такого же МДП ПТ, благодаря тому, что n^- – дрейфовая зона заполняется ННЗ.

Работа при обратном напряжении

При обратном напряжении (III квадрант), коллекторный pn -переход IGBT смещен в обратном направлении и **закрит**, 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:

- ↑ диапазона предельных коммутируемых токов и напряжений (единицы килоампер, 5-7 кВ);
- ↑ быстродействия;
- ↑ стойкости к перегрузкам и аварийным режимам;
- ↓ 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 быстросовсстанавливающихся обратных диодов;
- применения прямого водяного охлаждения для исключения соединения основание - охладитель.

