

# Твердотельная электроника

Презентации к лекционному курсу

Полевые транзисторы

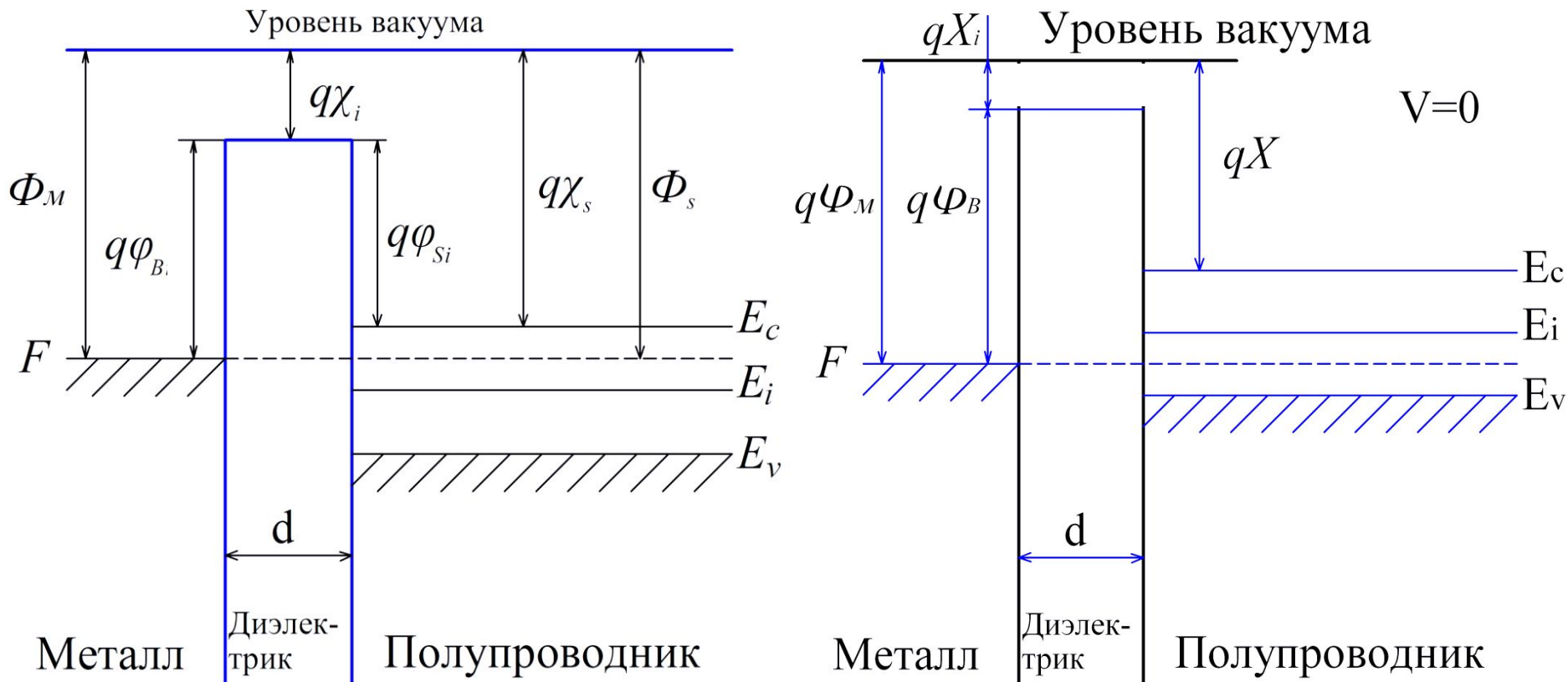
# МДП-СТРУКТУРЫ

# 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:

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

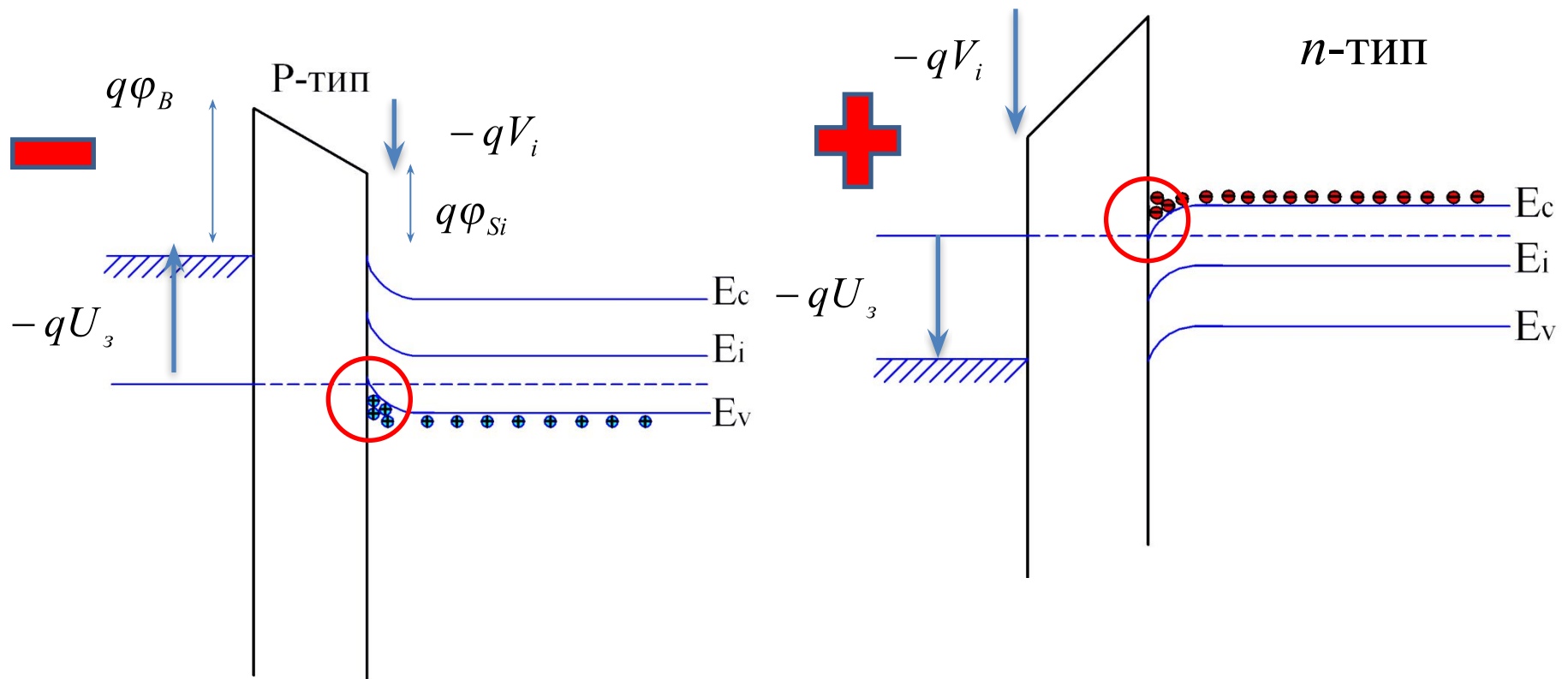
# Допущения для «идеальной» МДП-структуры

- 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.

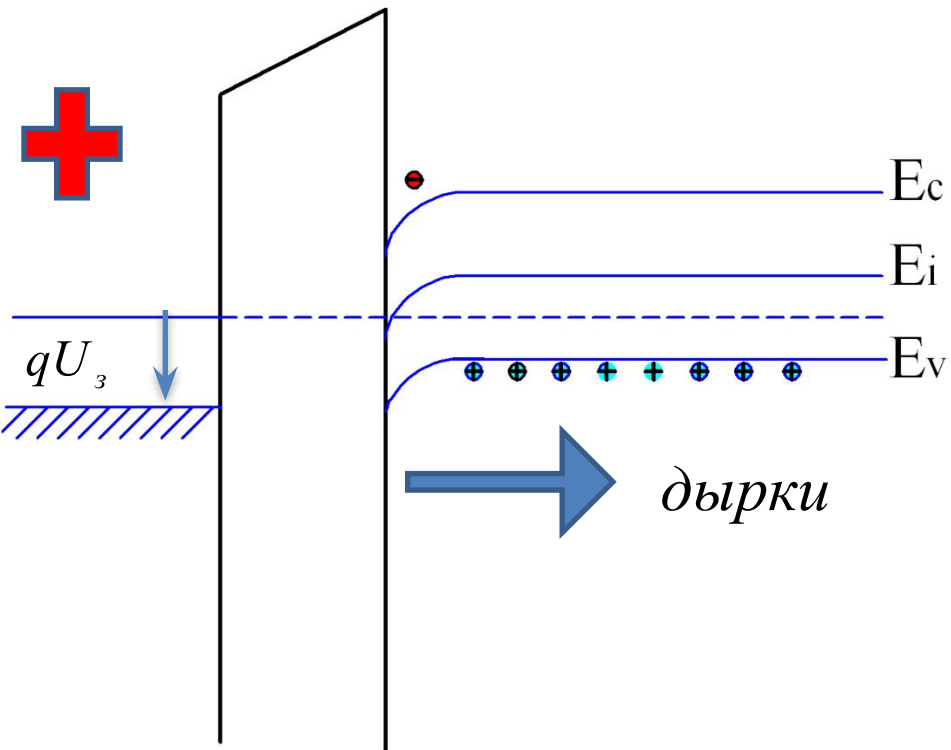
Если к МДП-структуре приложить эл. напряжение, то его обкладки зарядятся. В зависимости от знака и величины приложенного напряжения поверхность п/п-ка, будет *обогащаться* или *обедняться* ОНЗ, или произойдет *инверсия типа проводимости*

## *Режим обогащения*

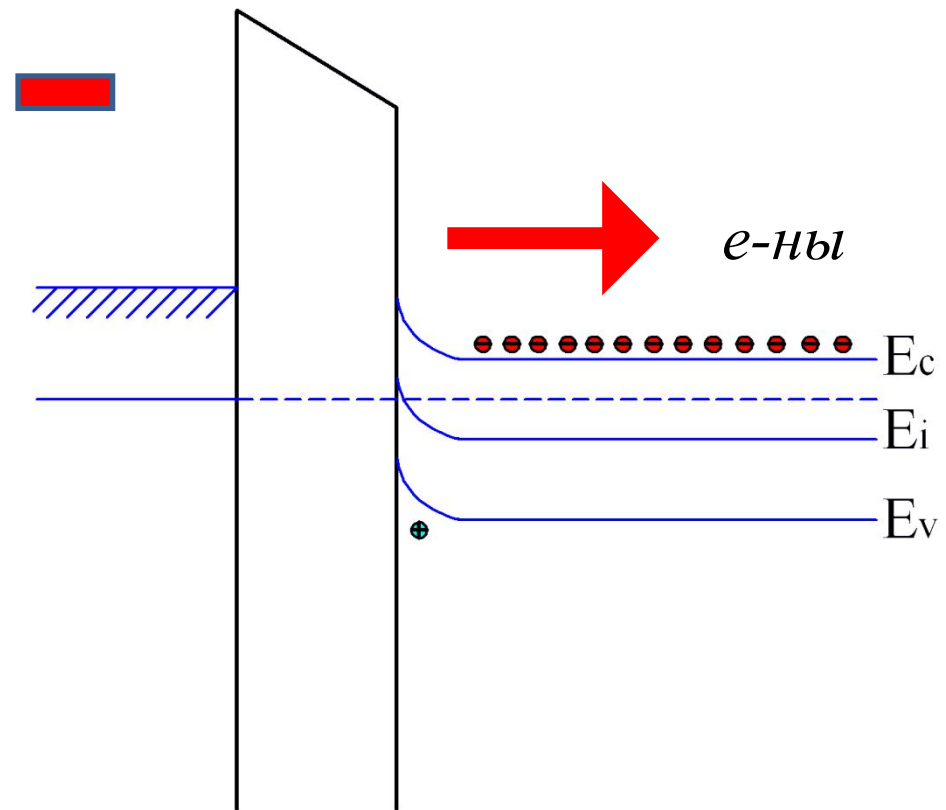


# Режим обеднения

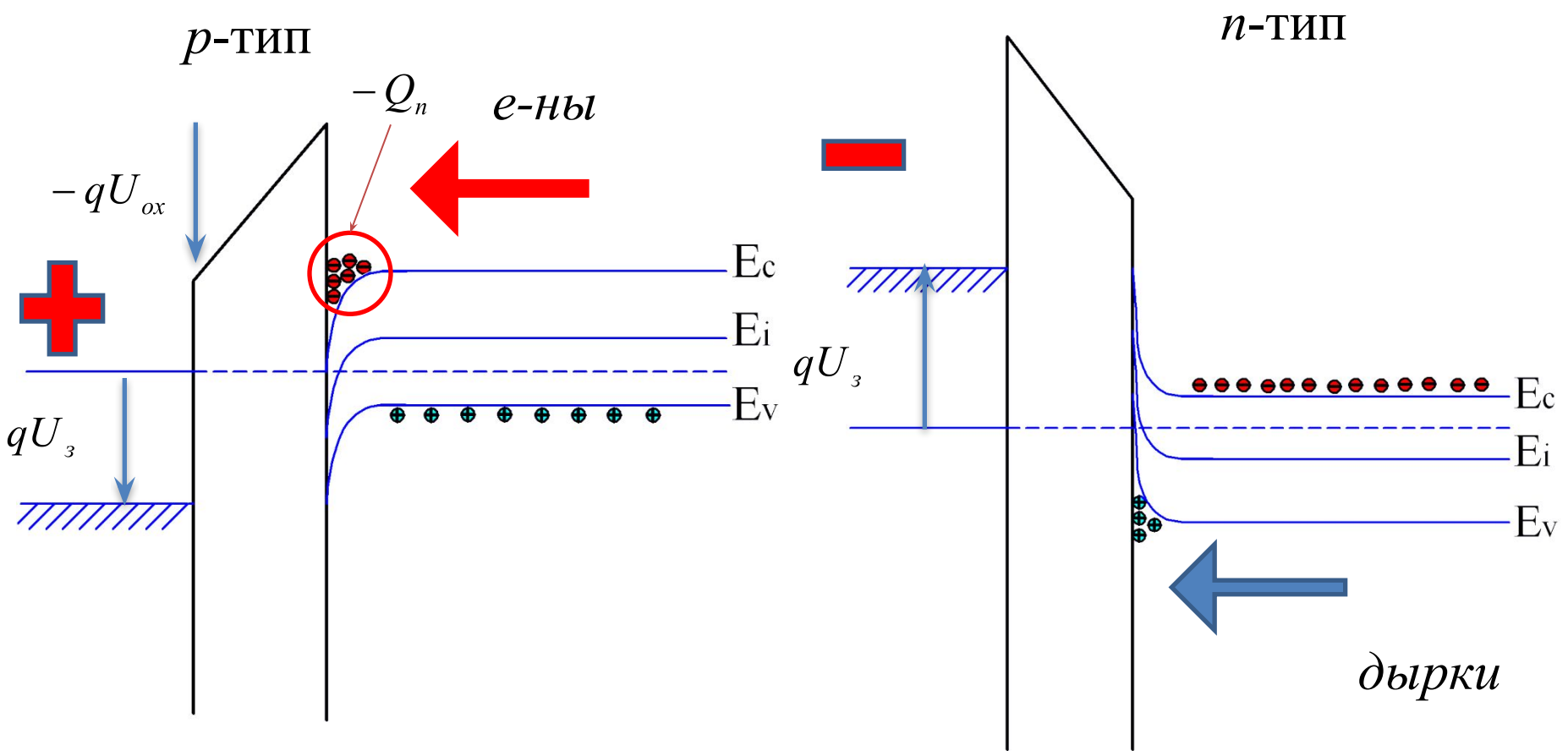
*p*-ТИП



*n*-ТИП

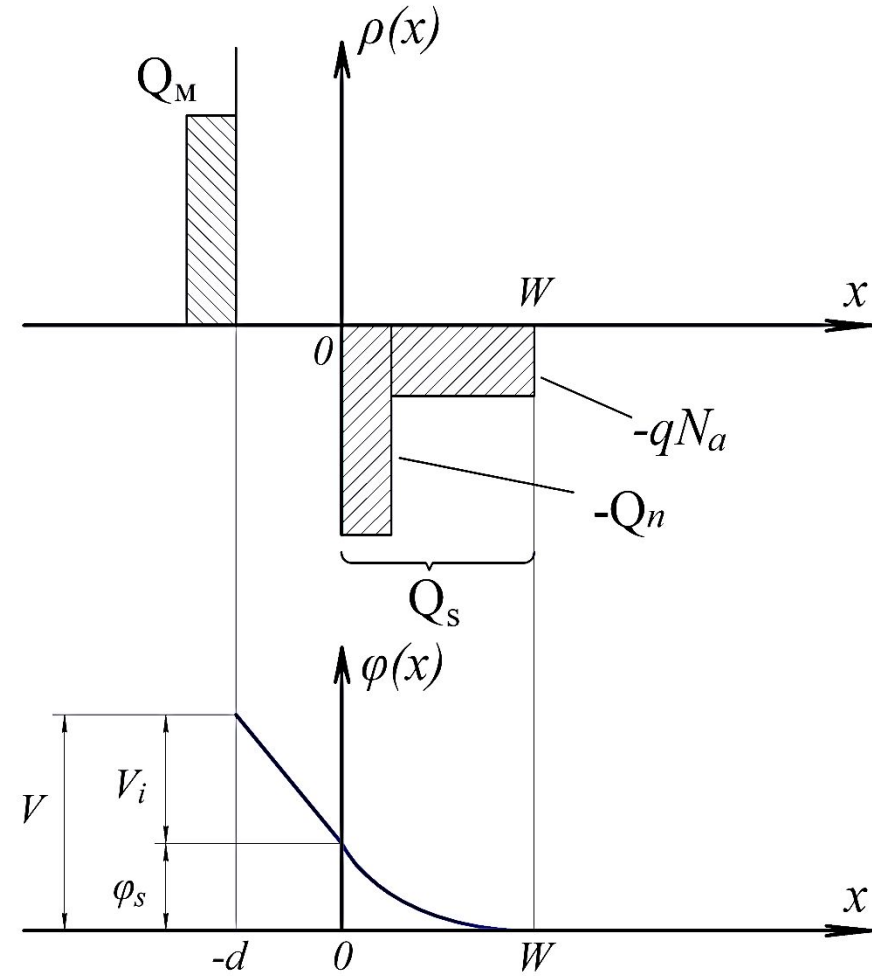
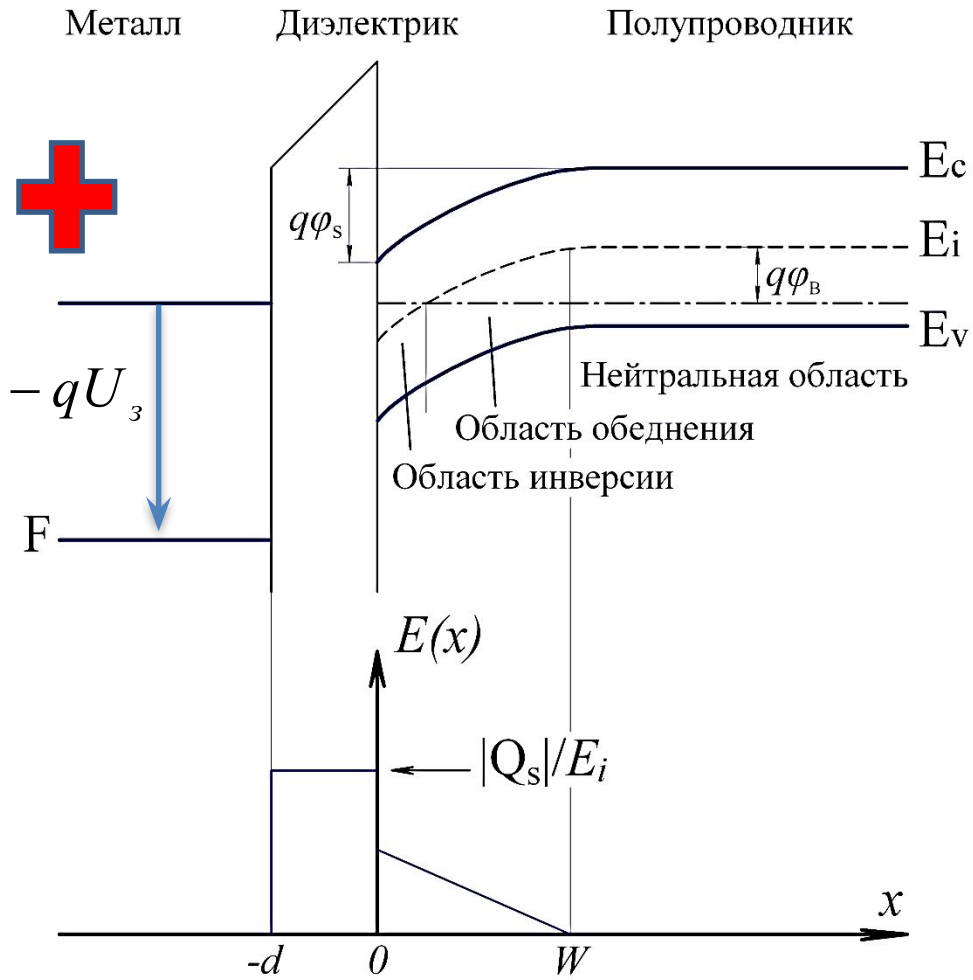


# Инверсия типа проводимости





# МДП-структура, инверсия типа проводимости



Для характеристики изгиба зон будем использовать понятие *поверхностного потенциала*  $\varphi_s$ . Рассмотрим п/п-к р-типа.

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

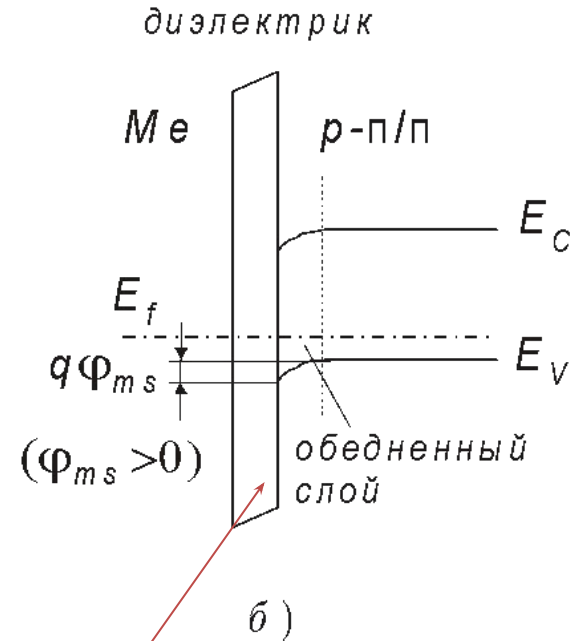
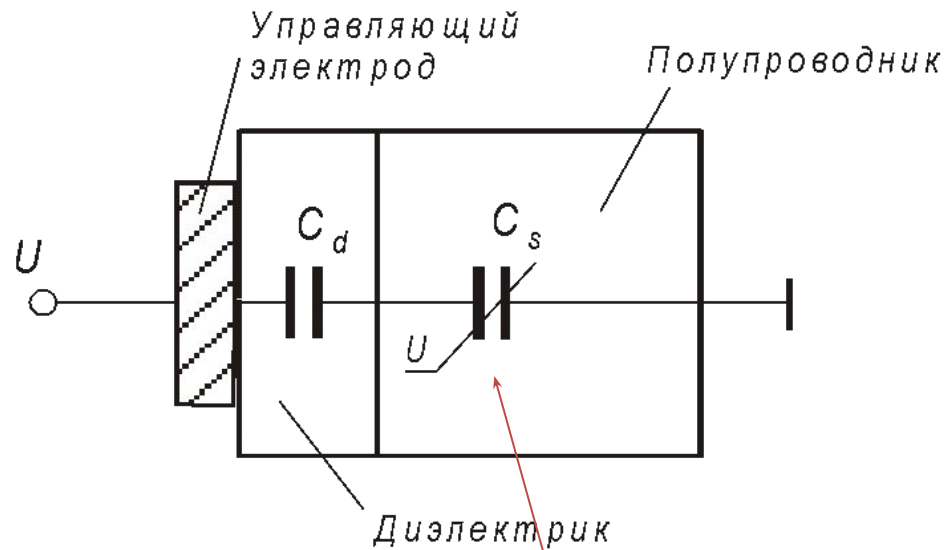
$$\varphi = 0; \quad \frac{d\varphi}{dx} = 0 \quad \text{при } x = w$$

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

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

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

# Емкость реальной МДП-структуры

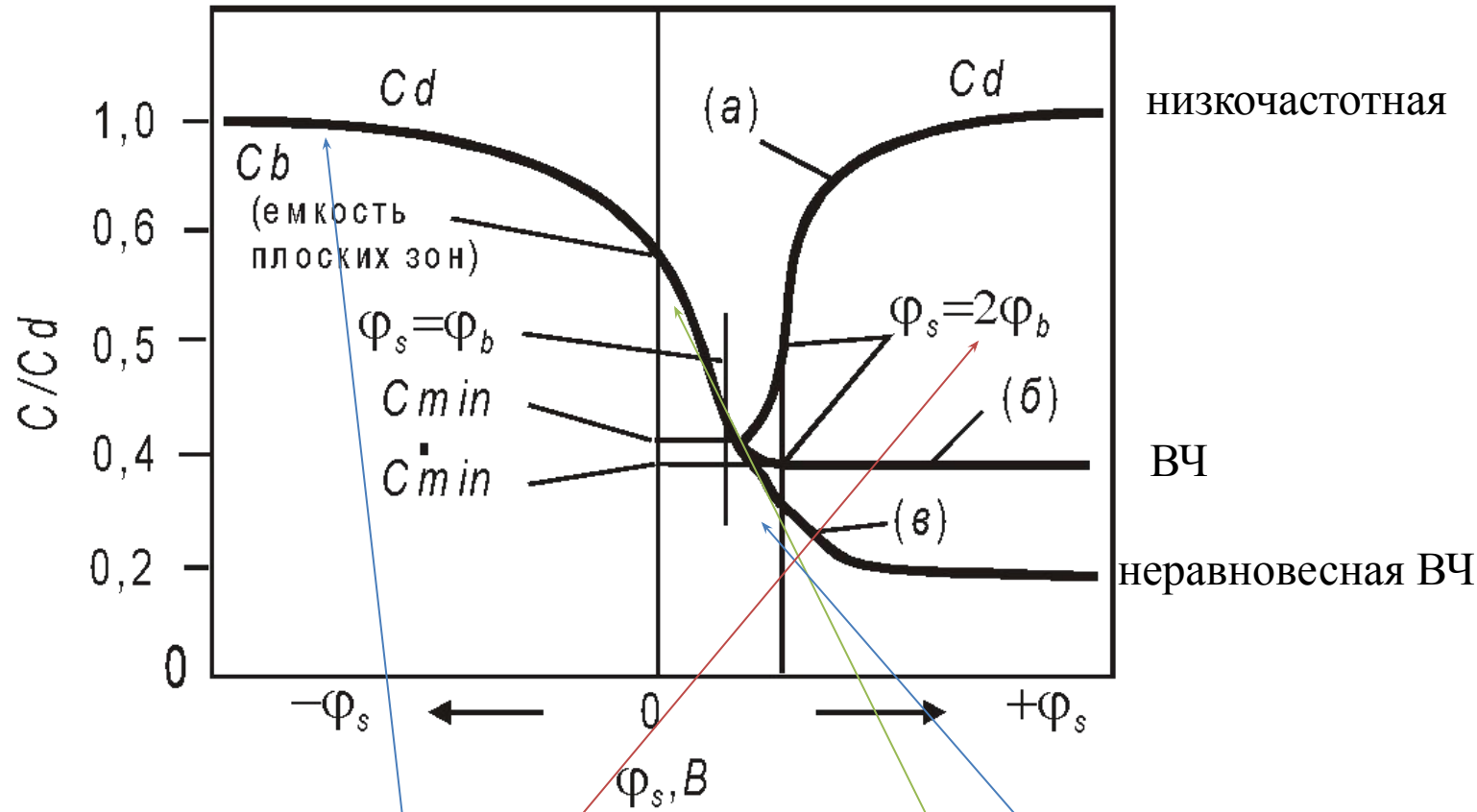


$$C_d = \frac{\varepsilon_d \varepsilon_0 \cdot S}{\delta_d}$$

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

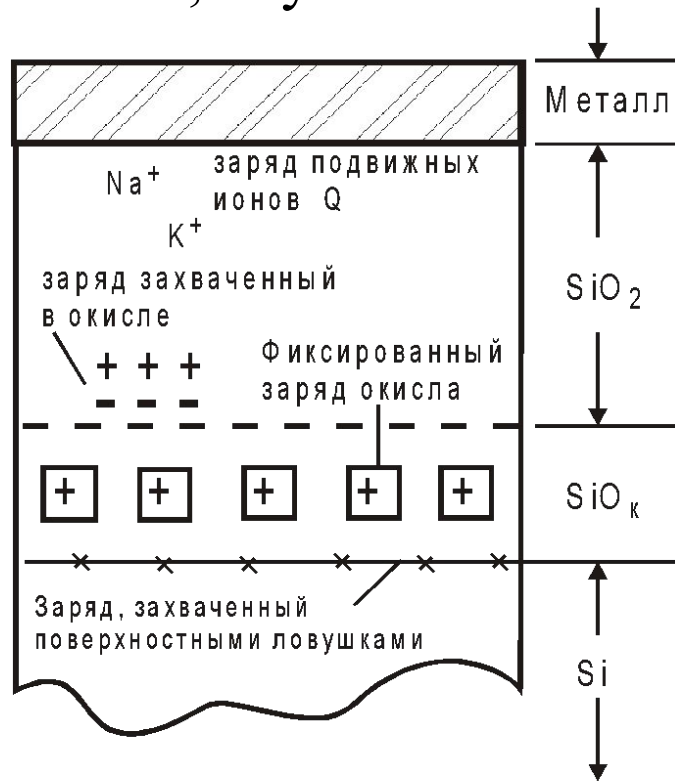
где  $\varepsilon_d$  – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;  
 $S$  – площадь управляющего электрода;  $\delta_d$  – толщина диэлектрика.  
Емкость полупроводника  $C_s$  является нелинейным элементом, т.к. определяется как конструктивными параметрами, так и напряжением смещения  $U$ .

# 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 –  $\text{SiO}_2$  – 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



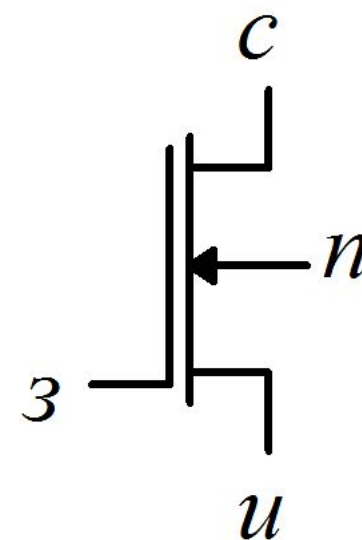
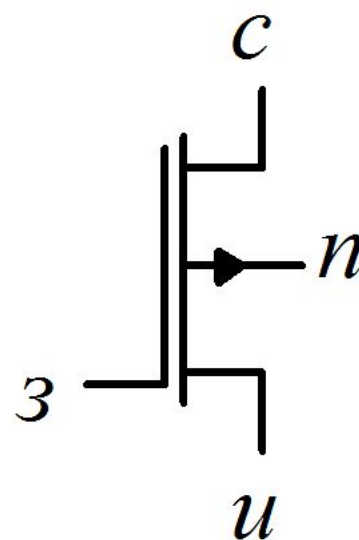
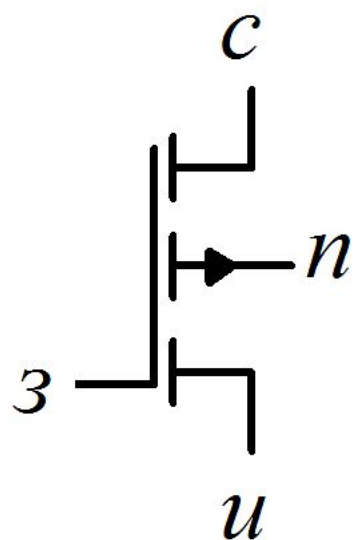
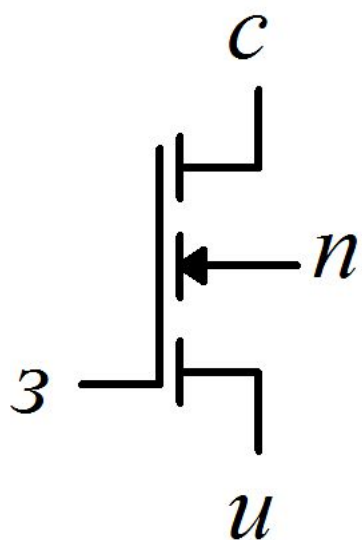
# МДП-транзистор

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



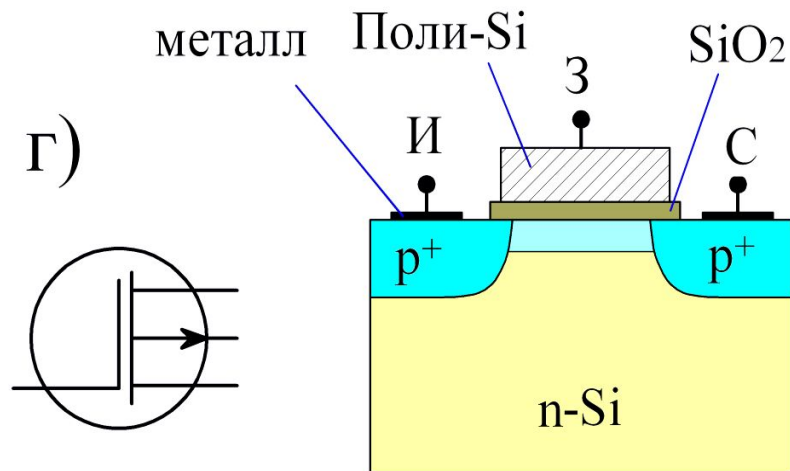
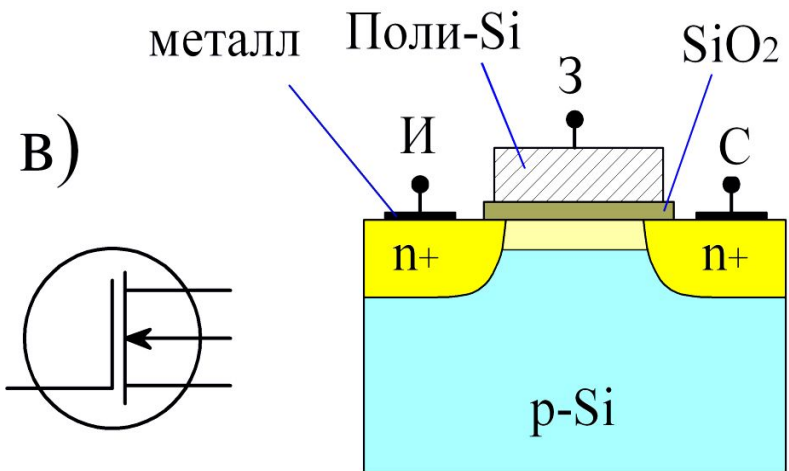
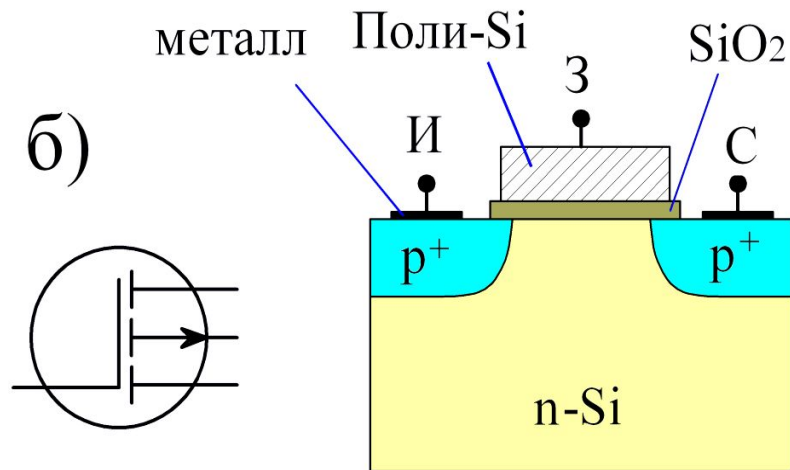
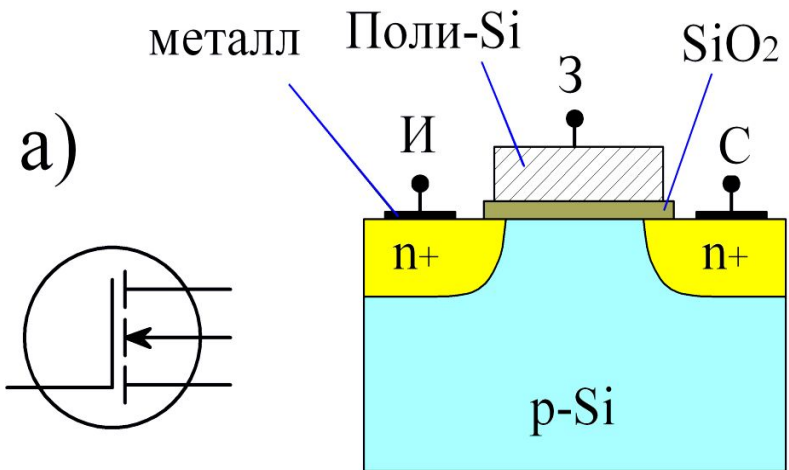
*n*-канальный

*p*-канальный

*p*-канальный

*n*-канальный

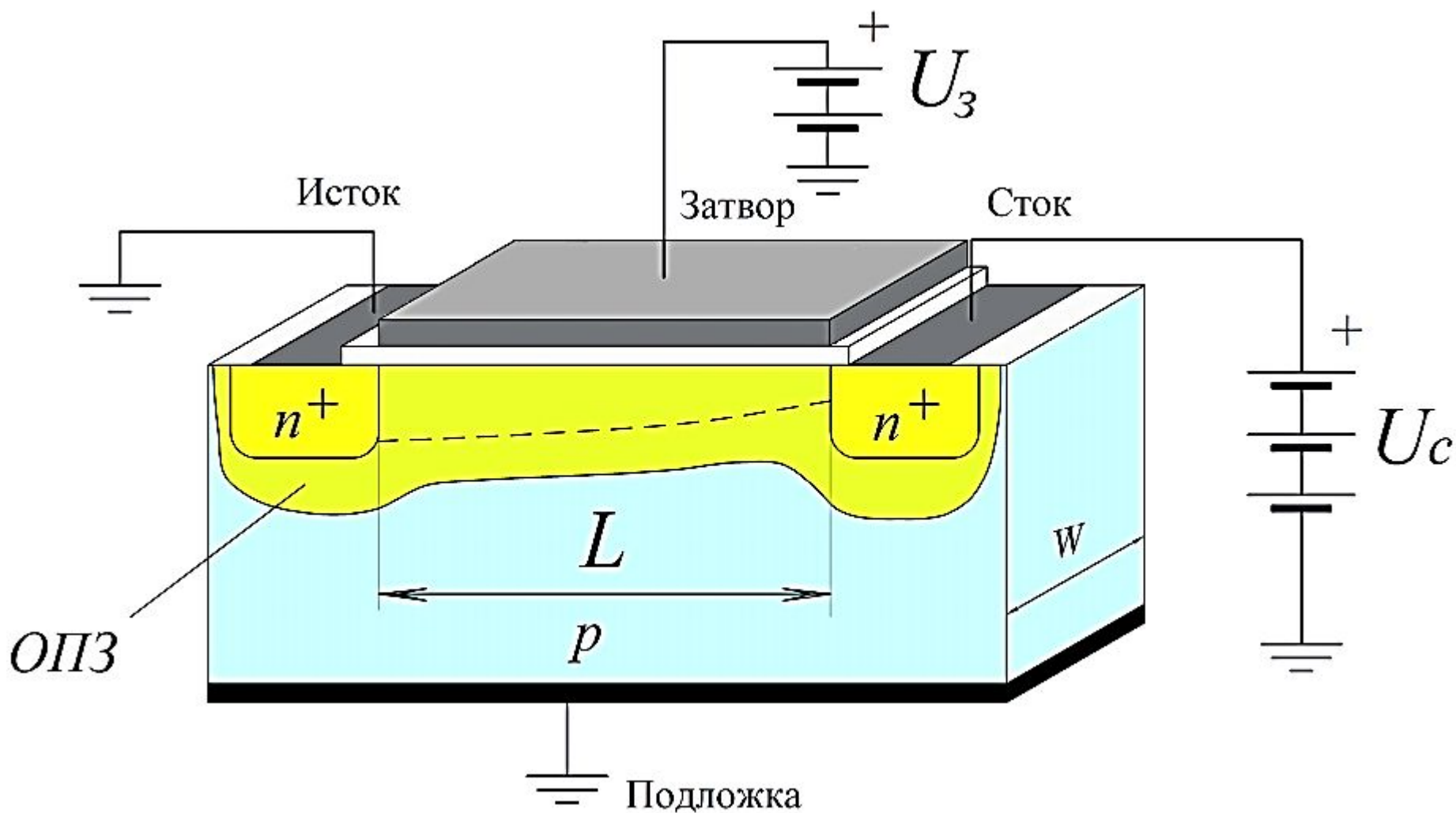
# СТРУКТУРЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ



а, б – с индуцированным каналом

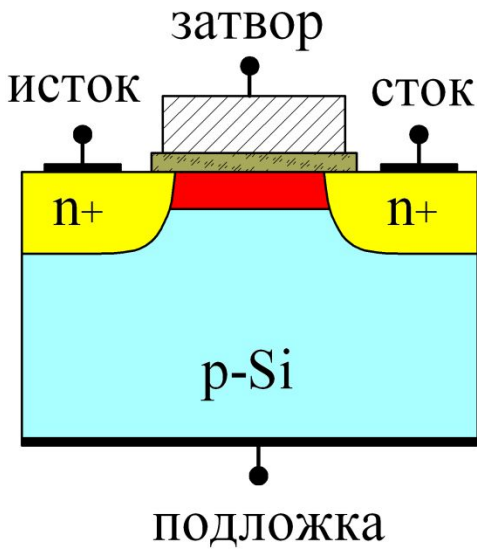
в, г – со встроенным каналом

# МДП-транзистор с индуцированным $n$ -каналом

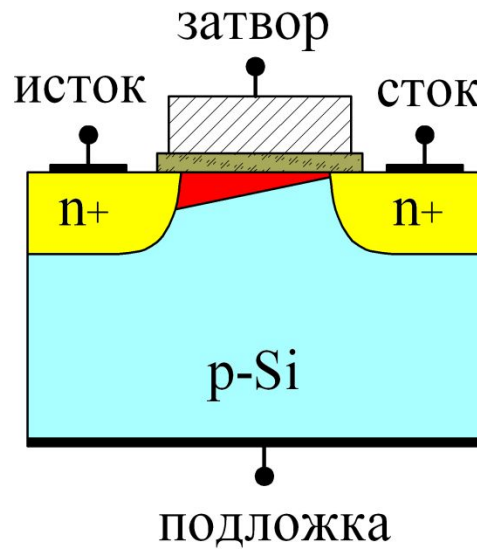




# ЗАКРЫТИЕ КАНАЛА

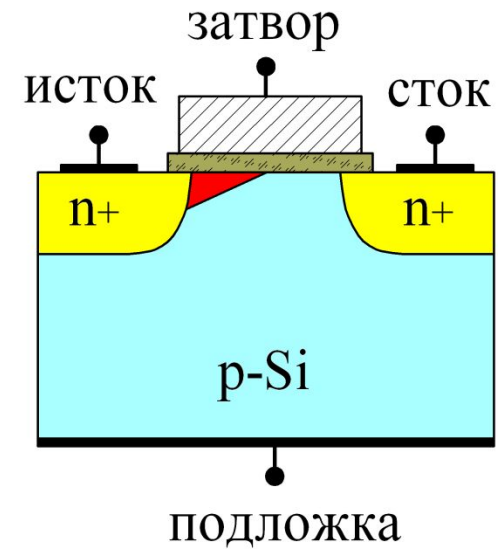


$$U_{си} = 0$$



$$U_{си} > 0$$

$$U_{зи} > U_{пор}$$



$$U_{си} > U_{нас}$$

## Сделаем следующие основные допущения:

- одномерное приближение, т.е. концентрации НЗ и потенциалы по сечению канала постоянны;
- на поверхности выполняется условие сильной инверсии ( $U_{ЗИ} > U_{Зпор}$ );
- 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  $\mu_s$  постоянна.

# РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК МДП-ТРАНЗИСТОРА

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

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

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

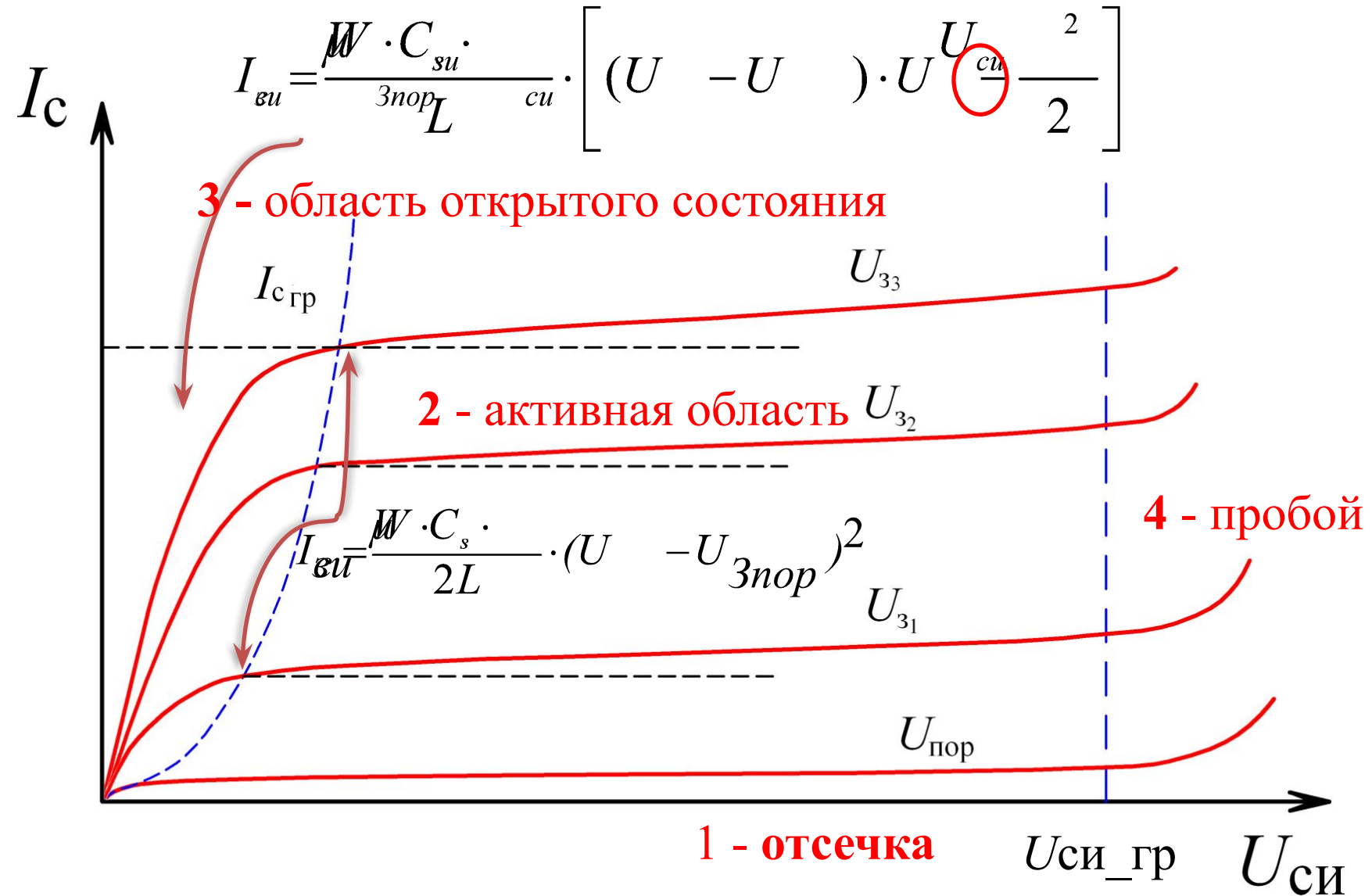
$$\sigma_c = \mu_s \cdot C_3 \cdot [U_3 - U_{пор} - U(x)]$$

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

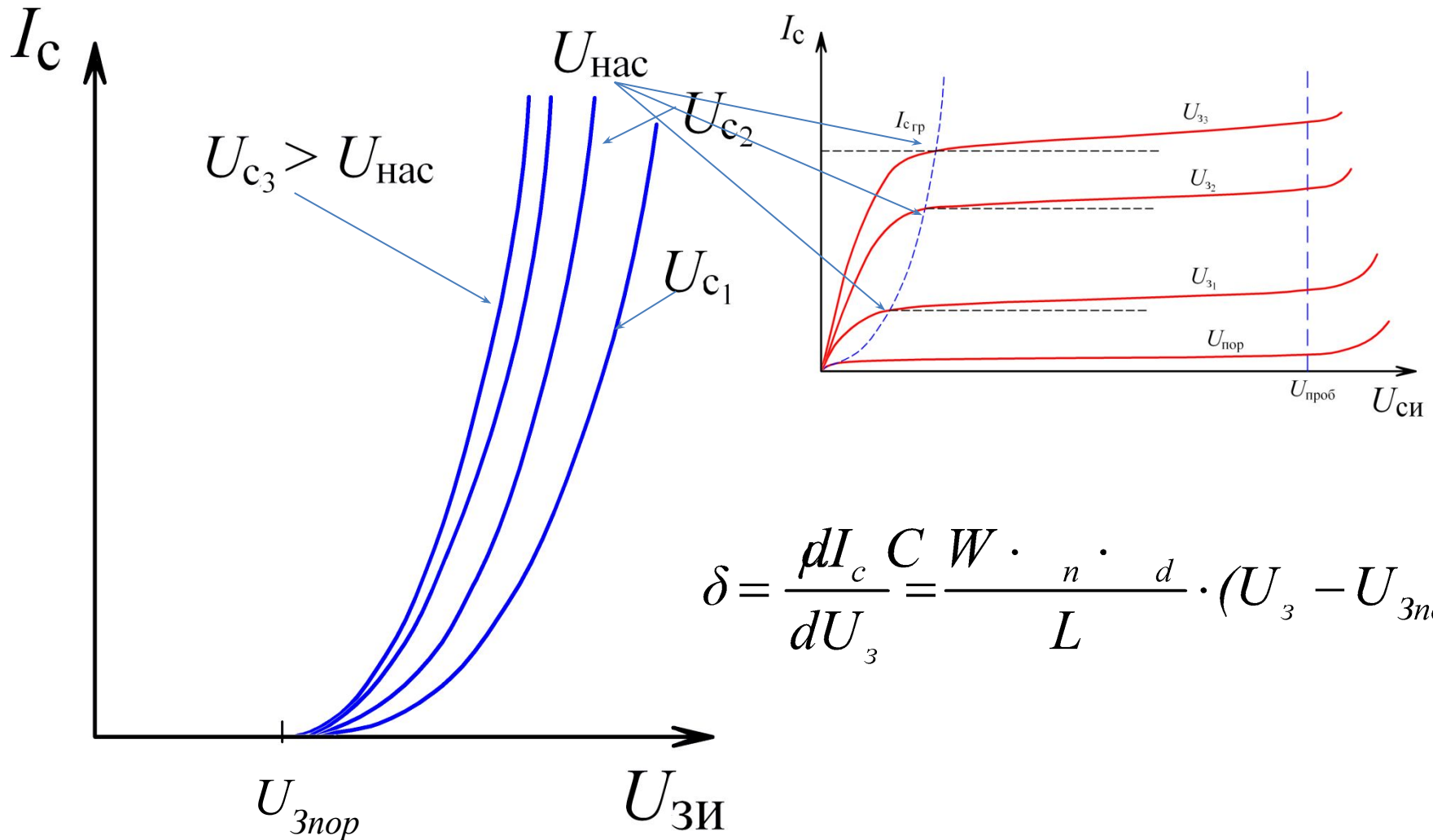
# ВЫХОДНАЯ ВАХ МДП-ТРАНЗИСТОРА С ИНДУЦИРОВАННЫМ КАНАЛОМ



# три основные рабочие области на выходной характеристике МДП-транзистора

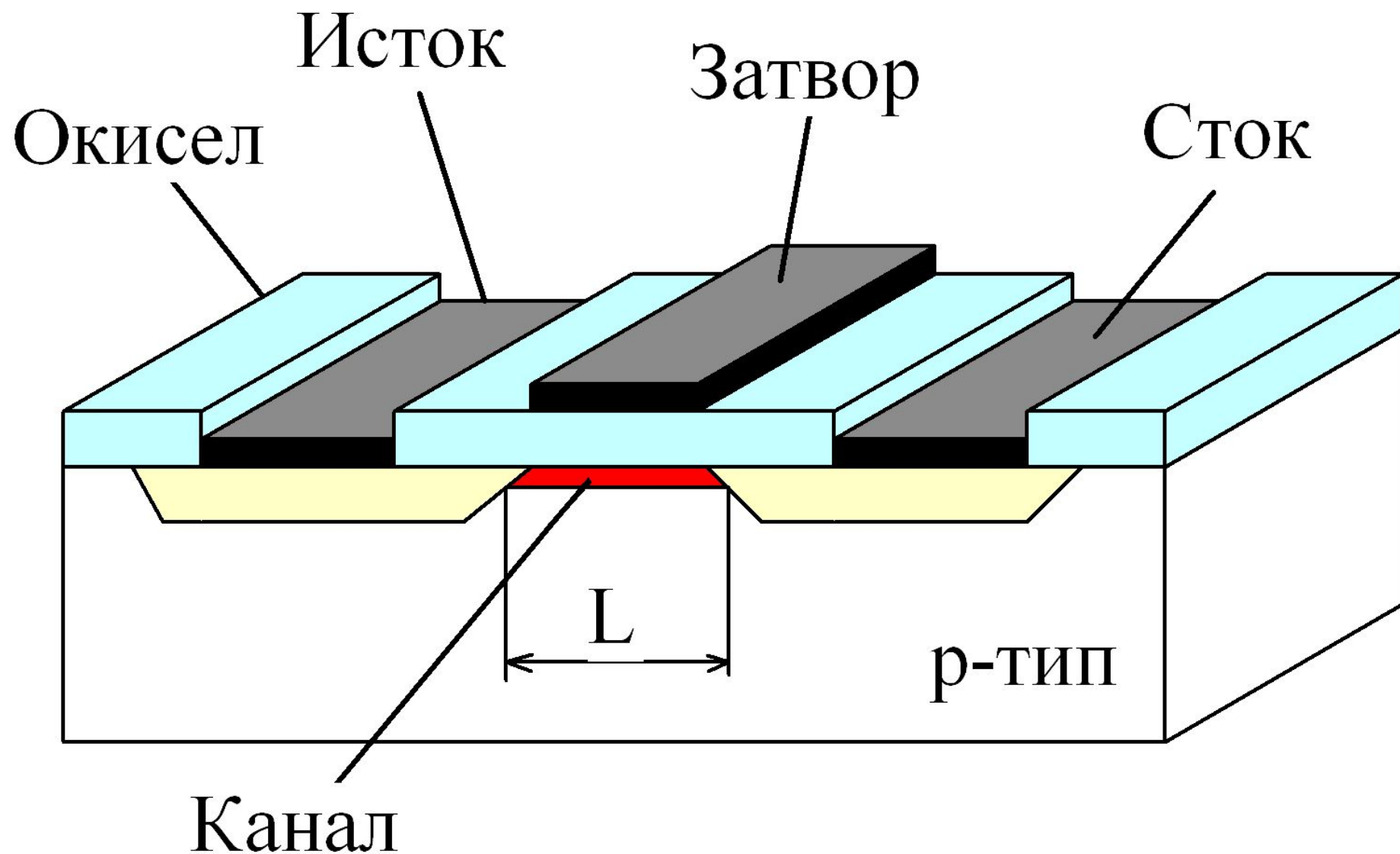
- 1 – область отсечки выходного тока: *транзистор заперт* ( $U_{ЗИ} < U_{Зпор}$ ), в цепи протекает малый обратный ток, обусловленный утечкой и обратным током стокового *pn*-перехода. МДП-транзистор, как и БТ, работает в ключевом режиме.
  - 2 – активная область (пологая часть выходных ВАХ  $U_{ЗИ} > U_{Зпор}$ ,  $U_{СИ} < U_{СИ\_гр}$ ) – 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

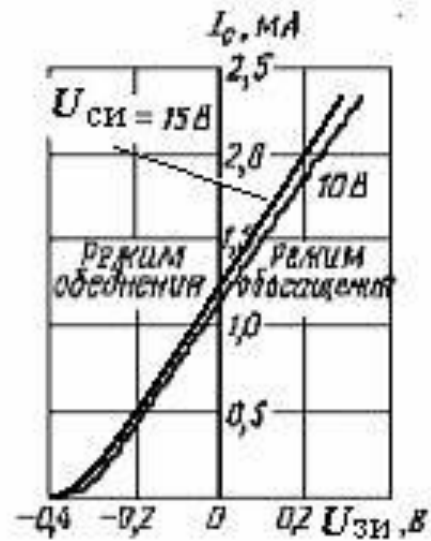
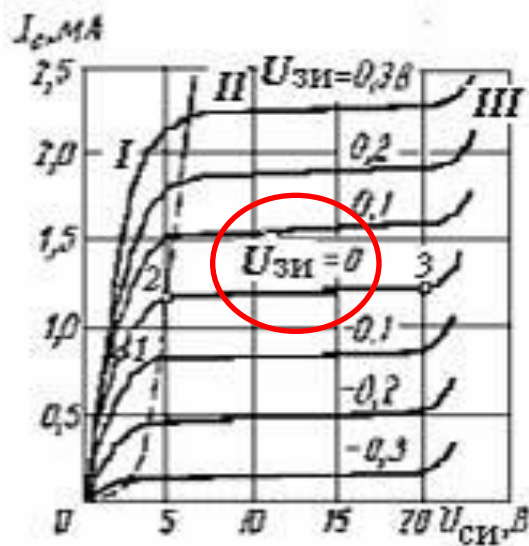
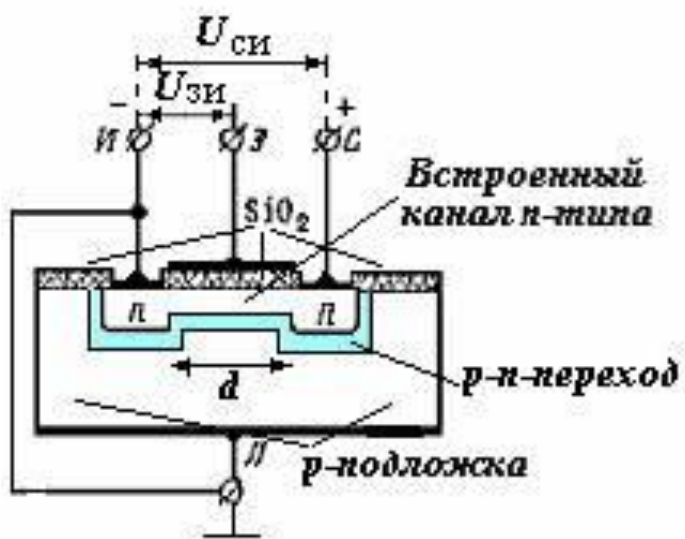


$$\delta = \frac{\rho I_c C W \cdot n \cdot d}{d U_3 L} \cdot (U_3 - U_{3пор})$$

# МДП-ТРАНЗИСТОР СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ

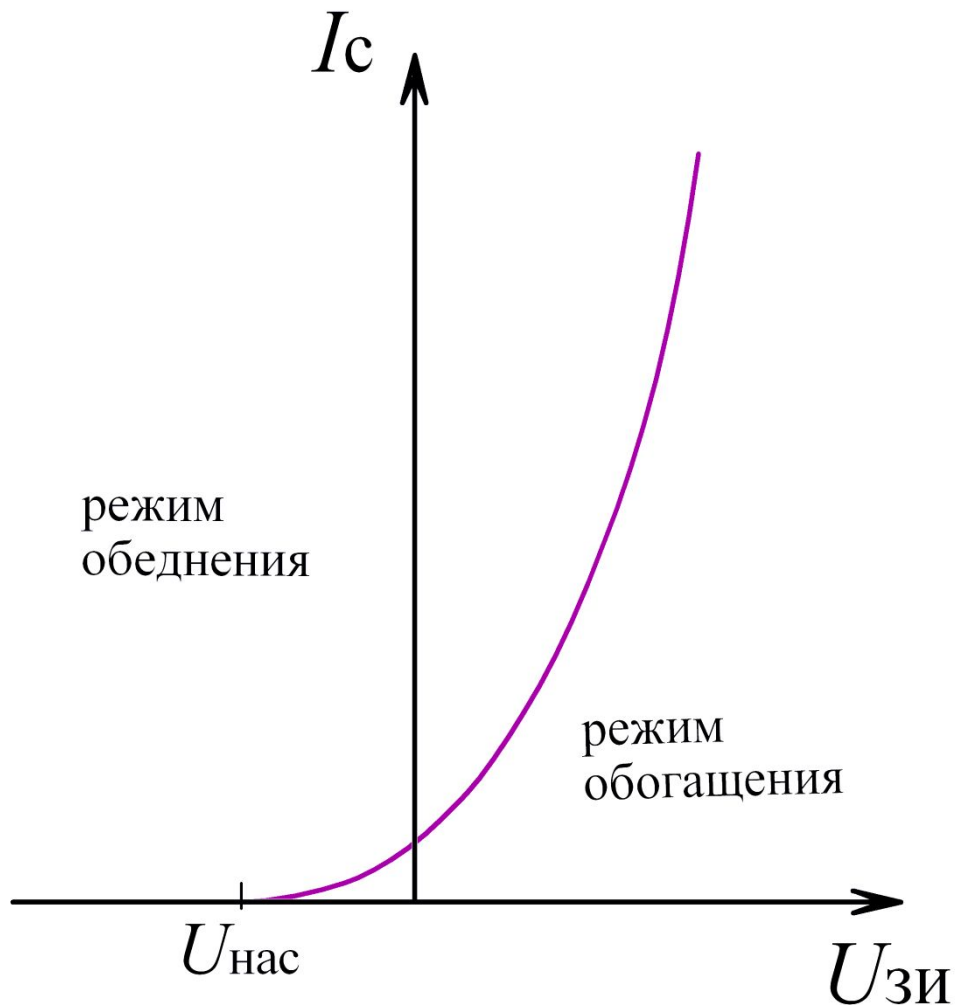


# МДП-ТРАНЗИСТОР СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ

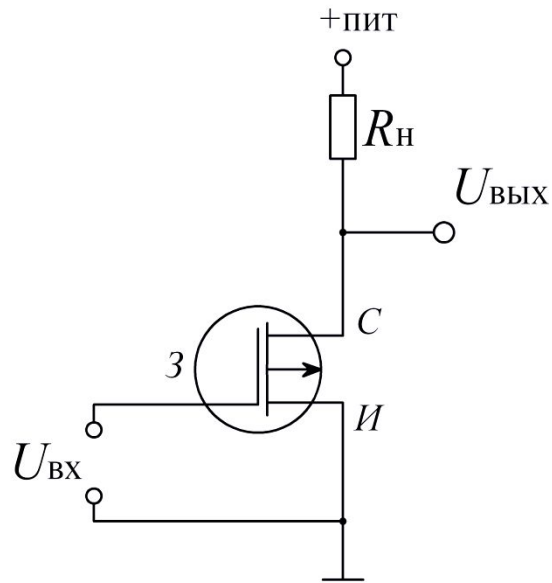




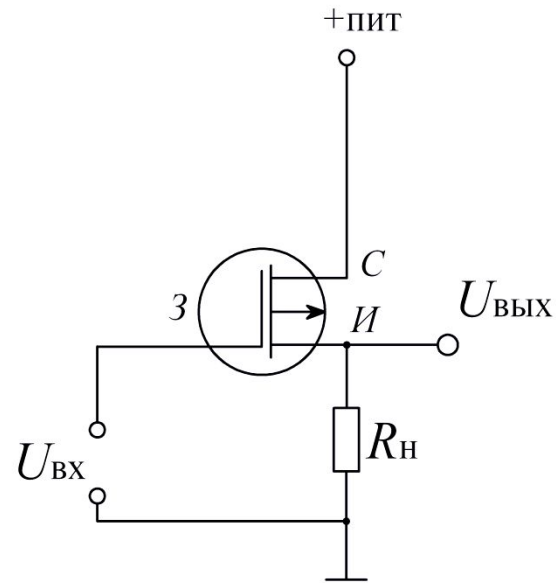
# ПЕРЕДАТОЧНАЯ Х-КА МДП-ТРАНЗИСТОРА СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ



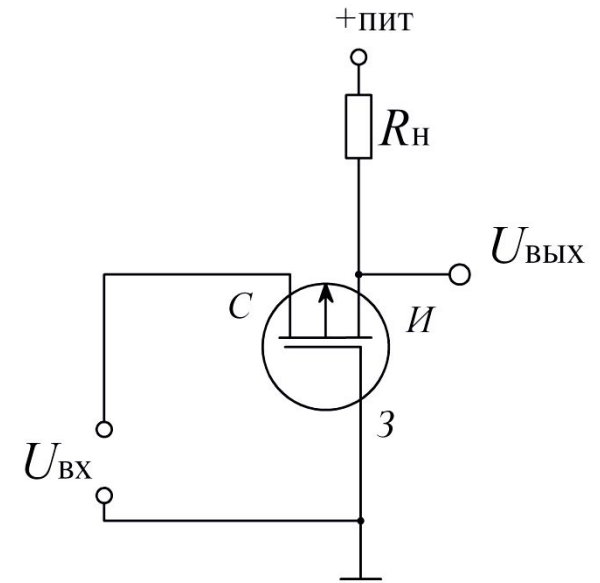
# ВАРИАНТЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА



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 запирации, 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 кило[герц](#) 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).

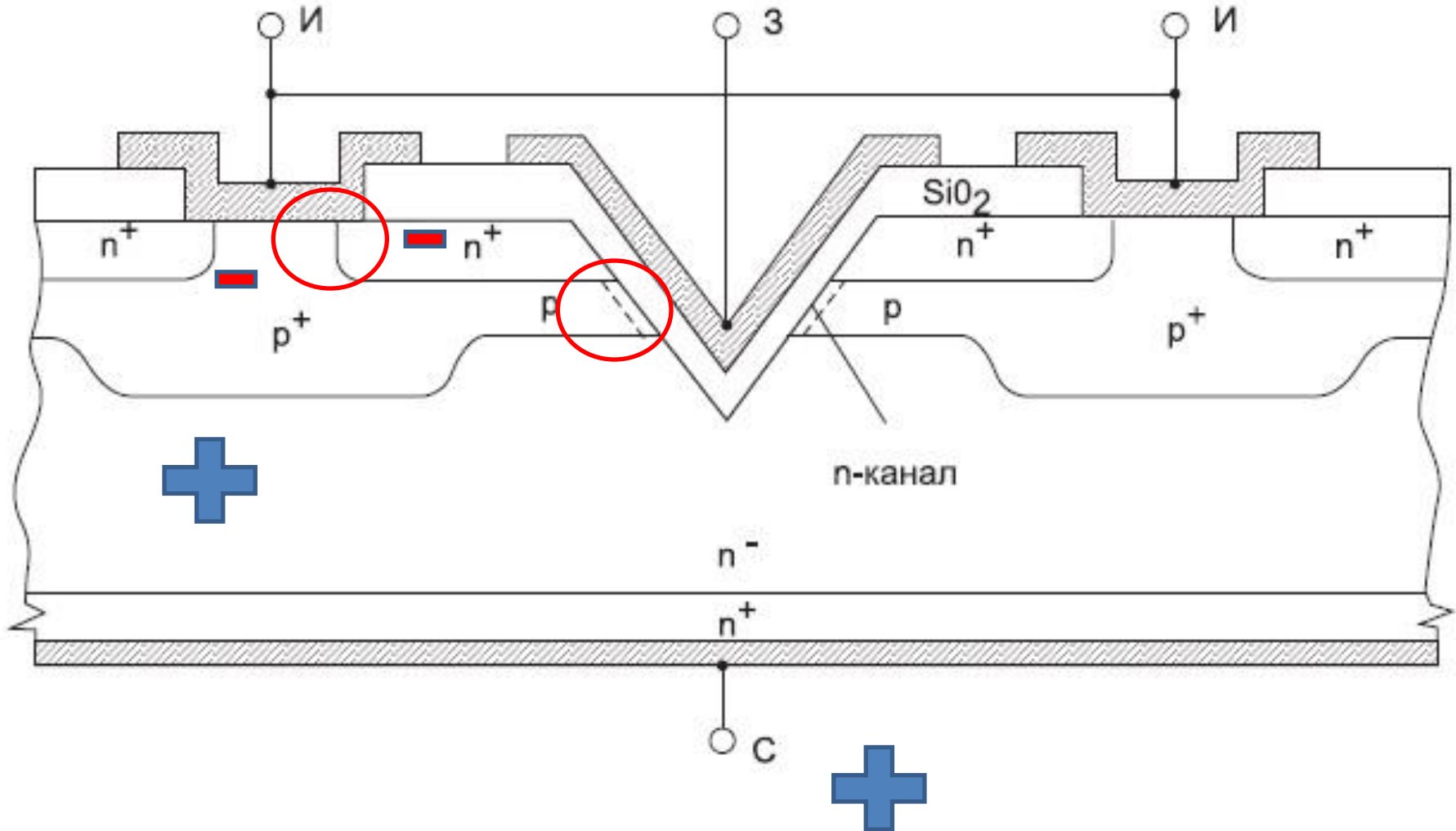
Такое составное включение ПТ и БТ позволяет сочетать в одном устройстве достоинства обоих типов п/п-ковых приборов.

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.

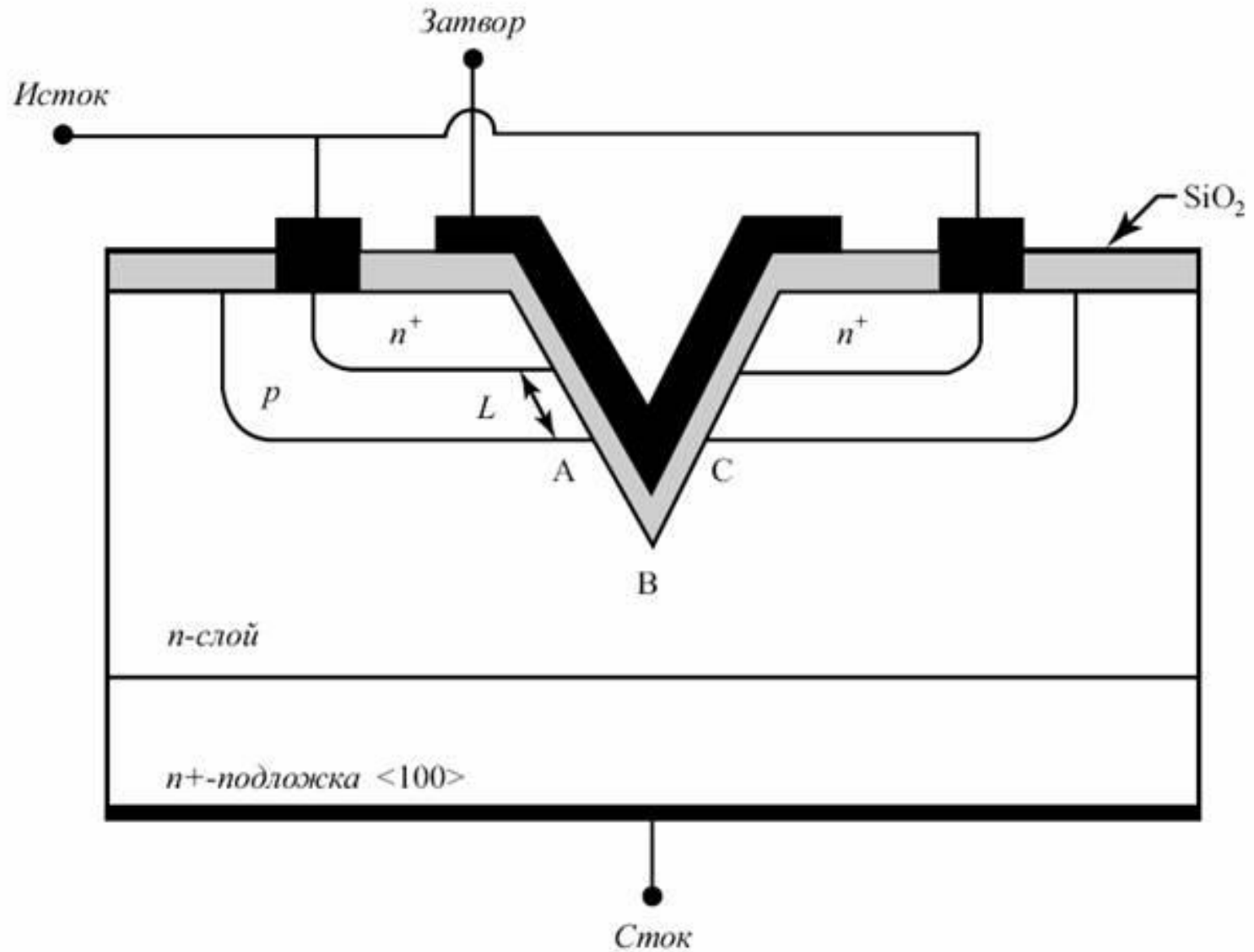
# Горизонтальная структура первых советских мощных МДП-транзисторов



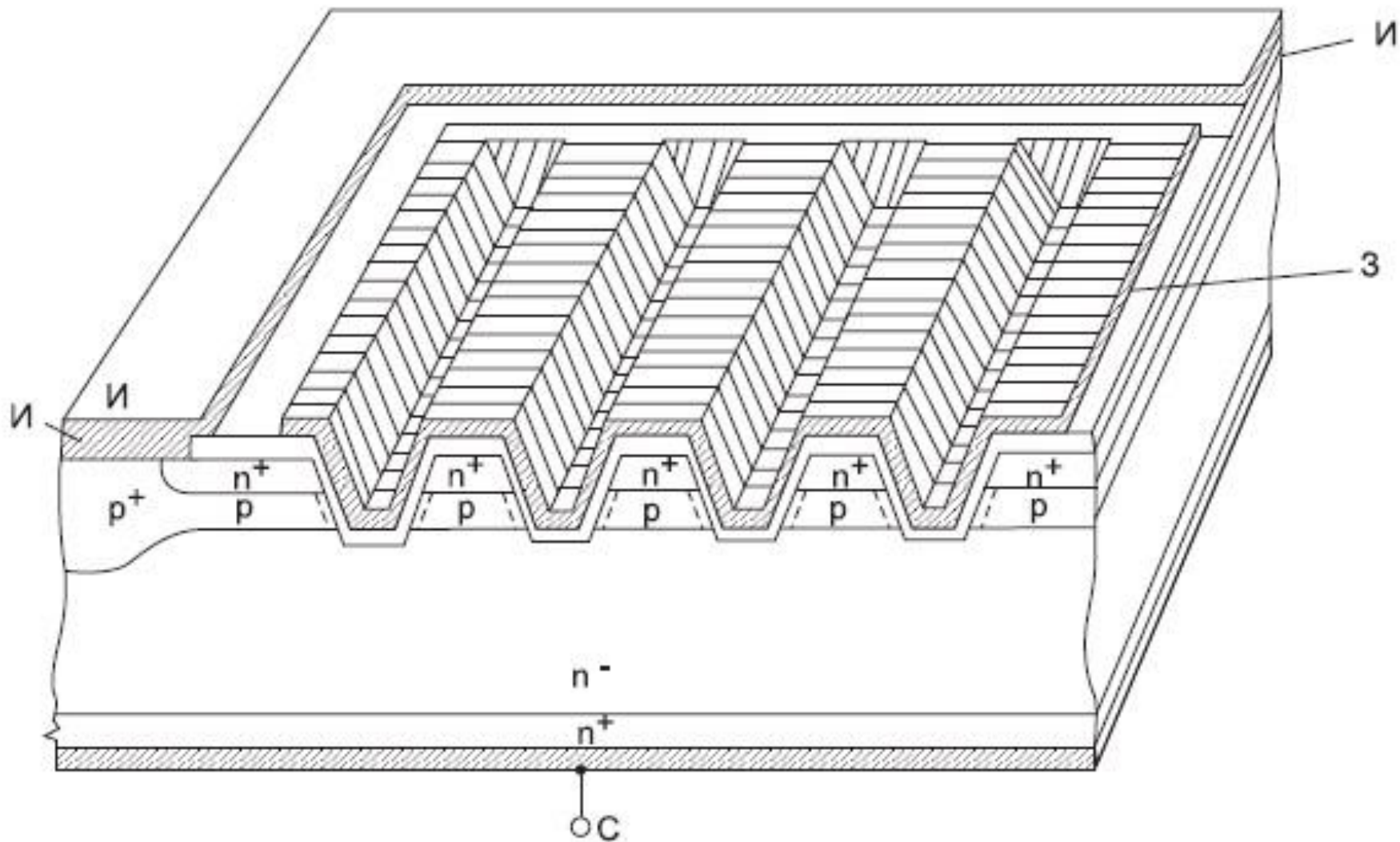
# МДП- транзистор с V-образной структурой



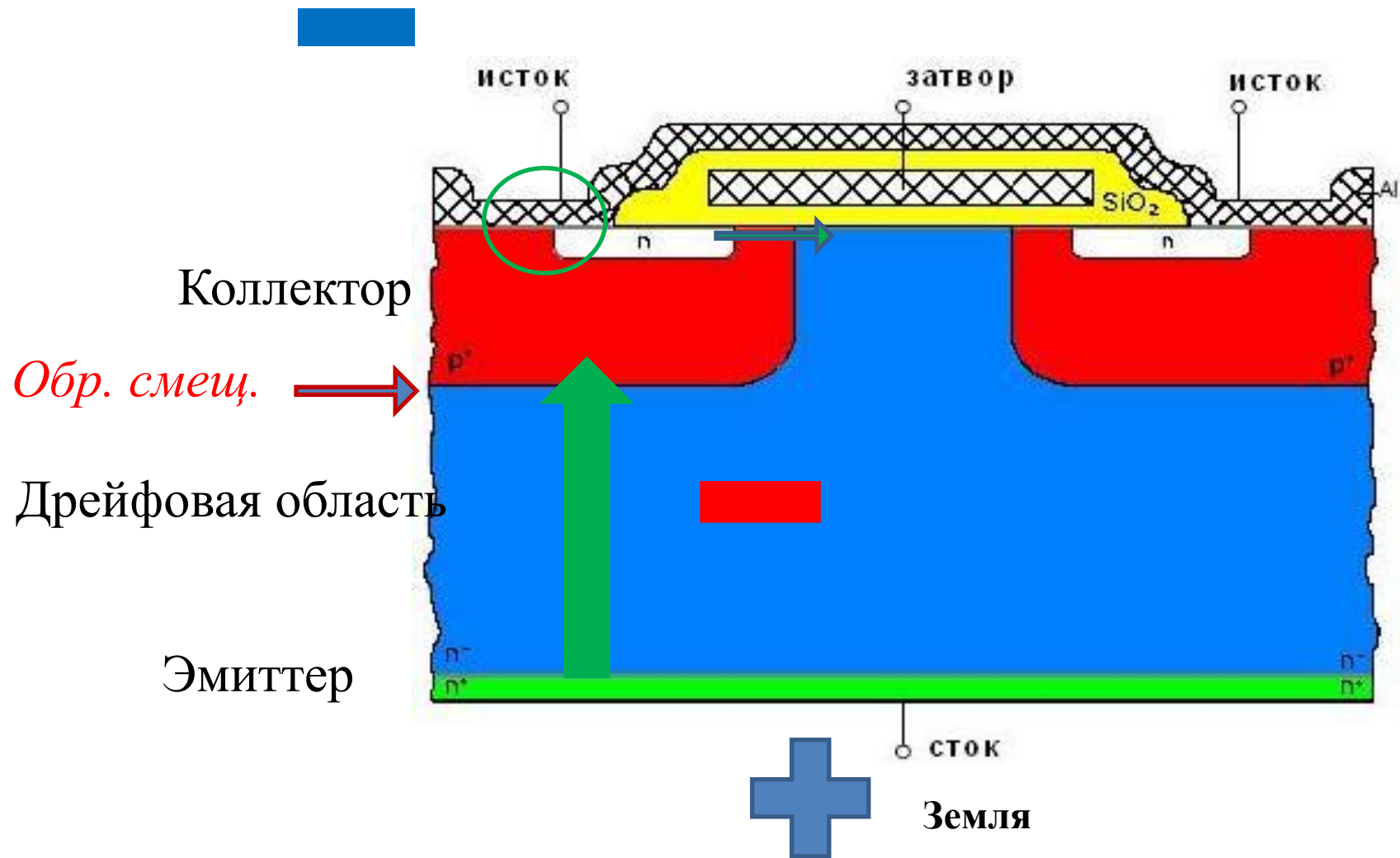
# Структура V-MOП



# МДП- транзистор с U -образной структурой



# Силовой MOSFET. Структура D-MOП



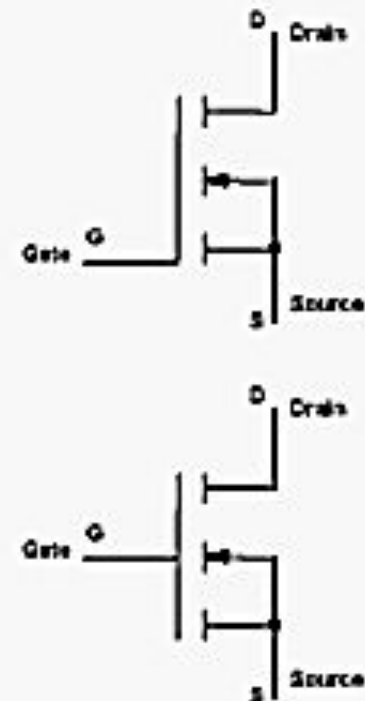
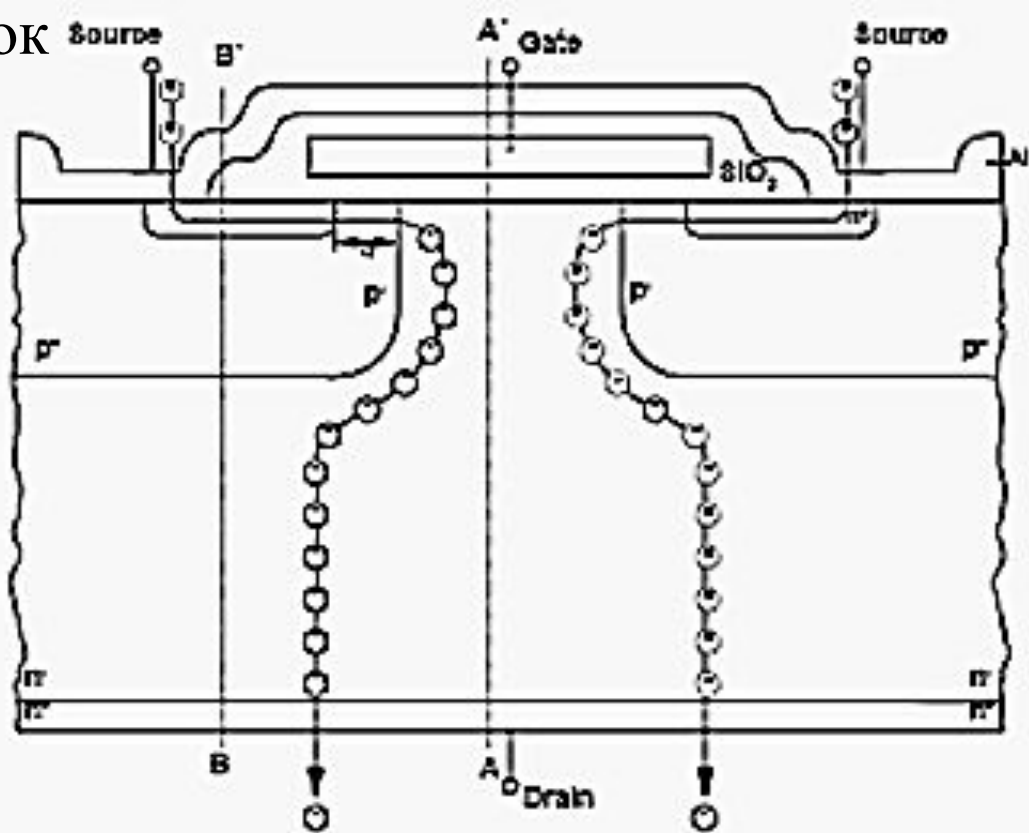
$p$ -коллектор соединен накоротко с истоком, положительное напряжение стока смещает переход  $p$ -коллектор –  $n$ -дрейфовая область в **обратном направлении**. Обедненный слой расширяется главным образом в  $n$ -дрейфовую область, потому что  $p$ -коллектор имеет более высокий уровень легирования. 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)



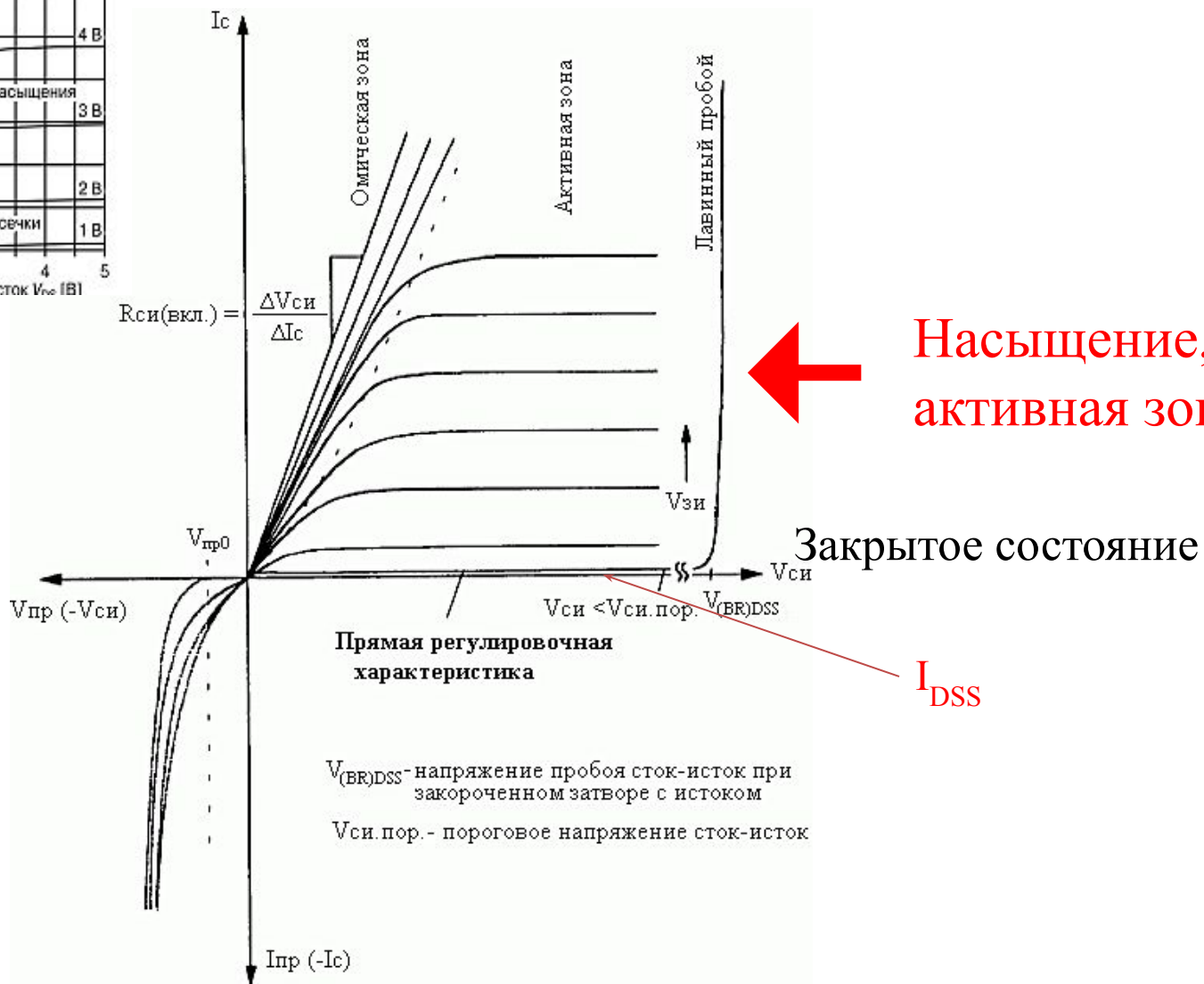
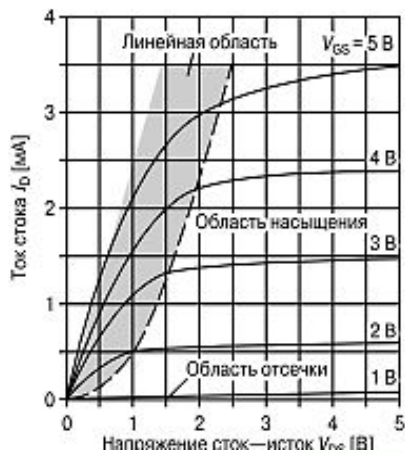
Сток

Земля

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



# Основная выходная характеристика силового транзисторного модуля



← Насыщение, активная зона ВАХ

$I_{DSS}$

## 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  $I_{\text{DSS}}$ .  $I_{\text{DSS}}$  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.

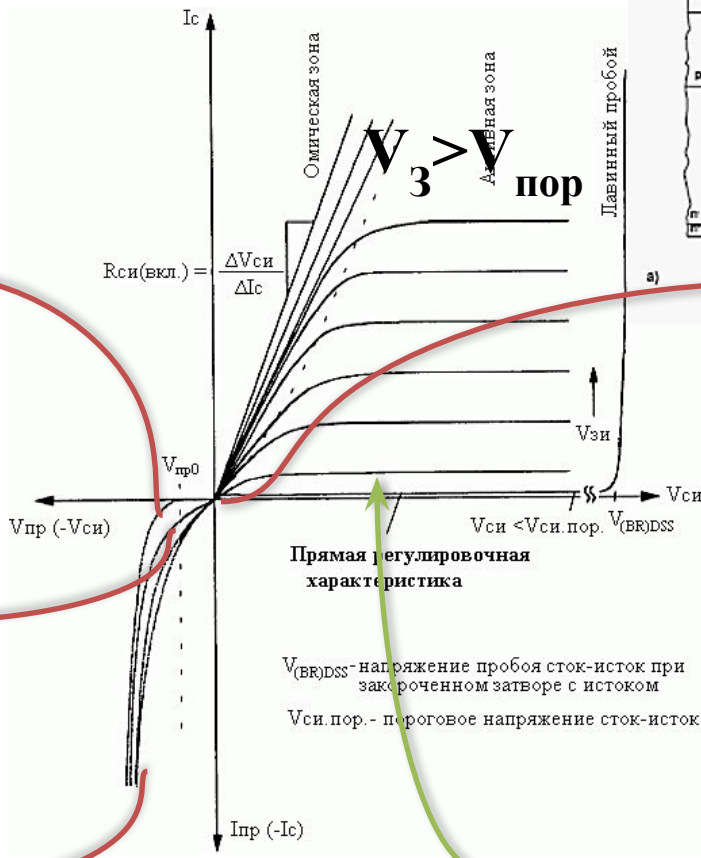
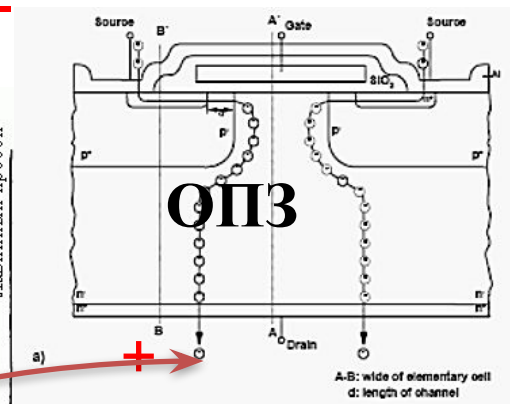
Увеличенный ток, созданный лавинным пробоем диода коллектор-база, может привести к разрушению МДП ПТ.

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:

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

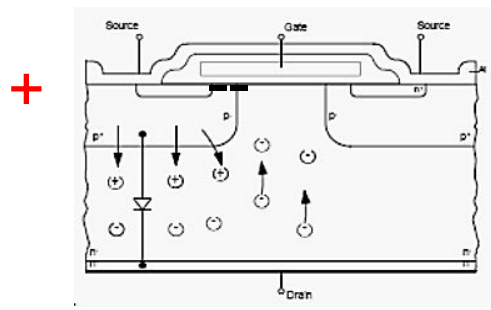
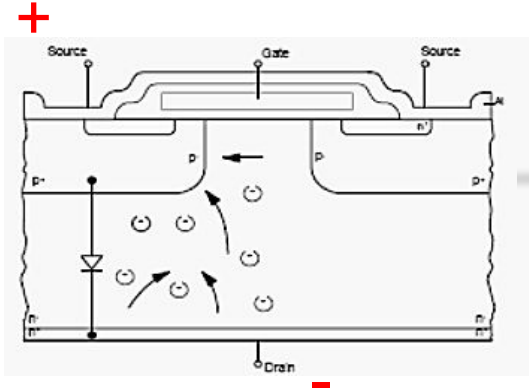
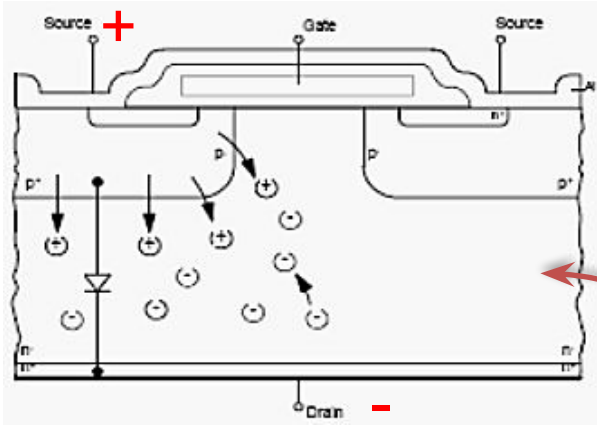


$V_3 > V_{пор}$

Прямая регулировочная характеристика

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

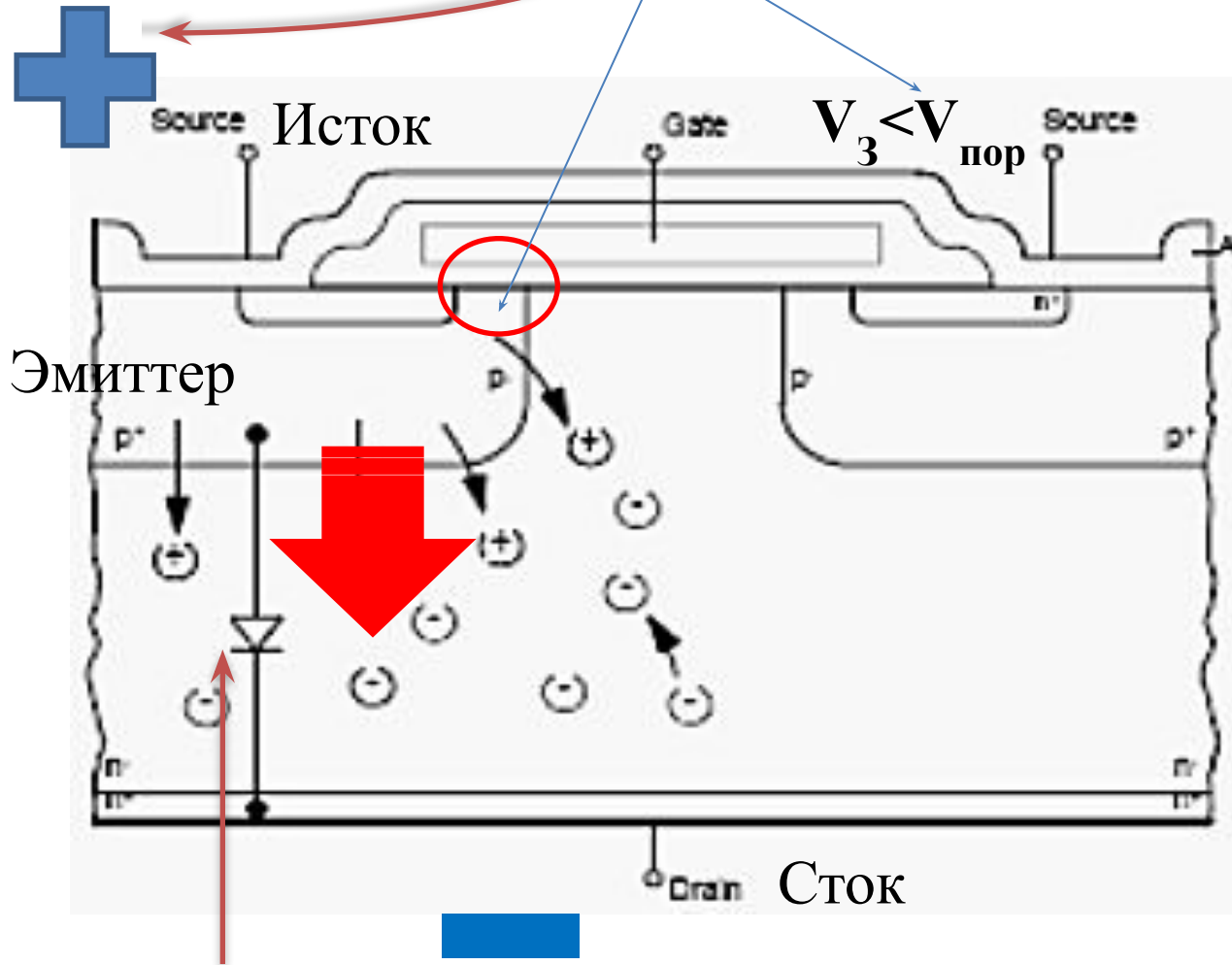
$V_3 < V_{пор}$



## Работа при обратном напряжении

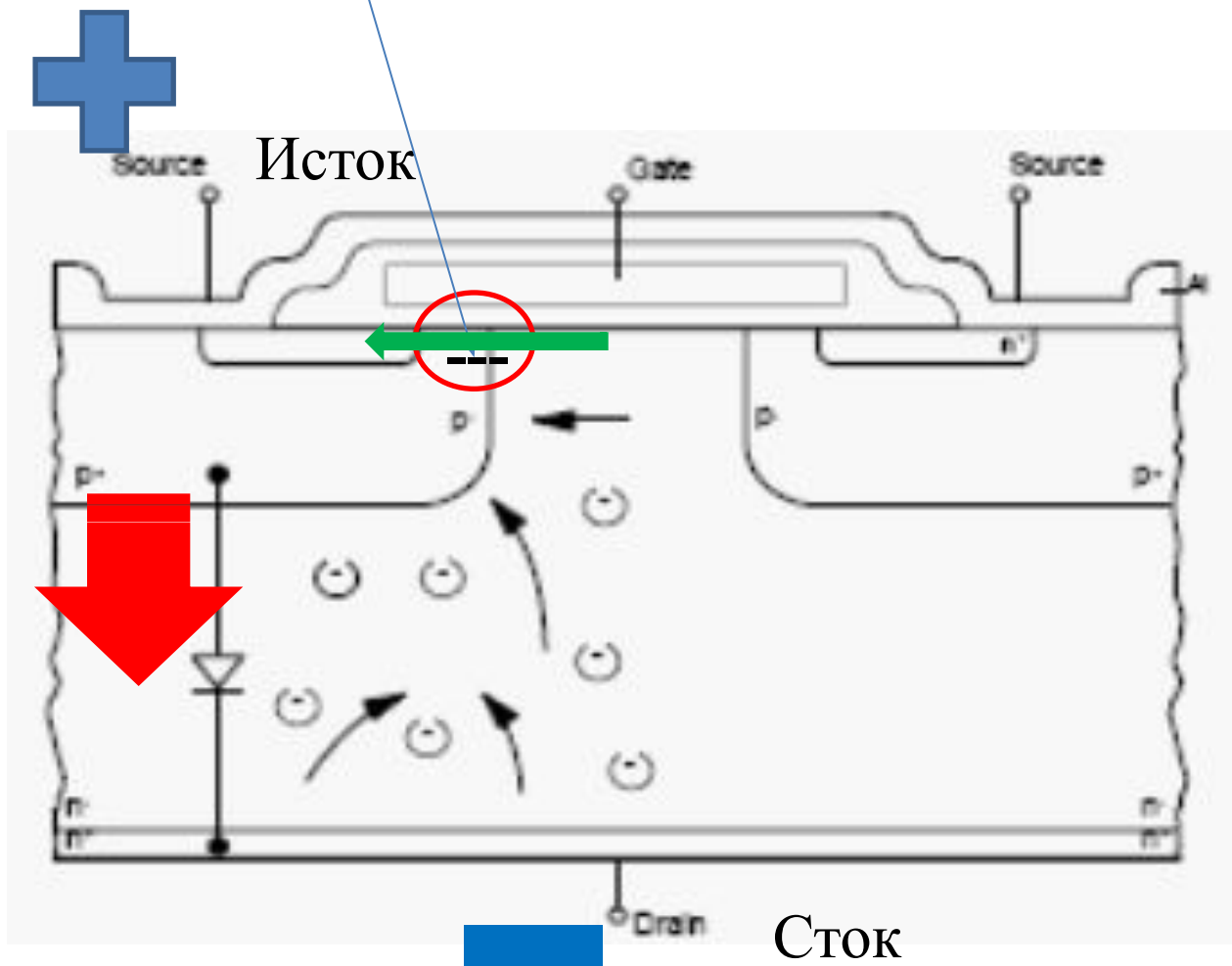
При обратном напряжении (III квадрант) характеристика МДП ПТ эквивалентна диодной при  $V_{зс} < V_{зс(пор)}$ . Это происходит из-за паразитного диода в МДП ПТ

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



паразитный диод

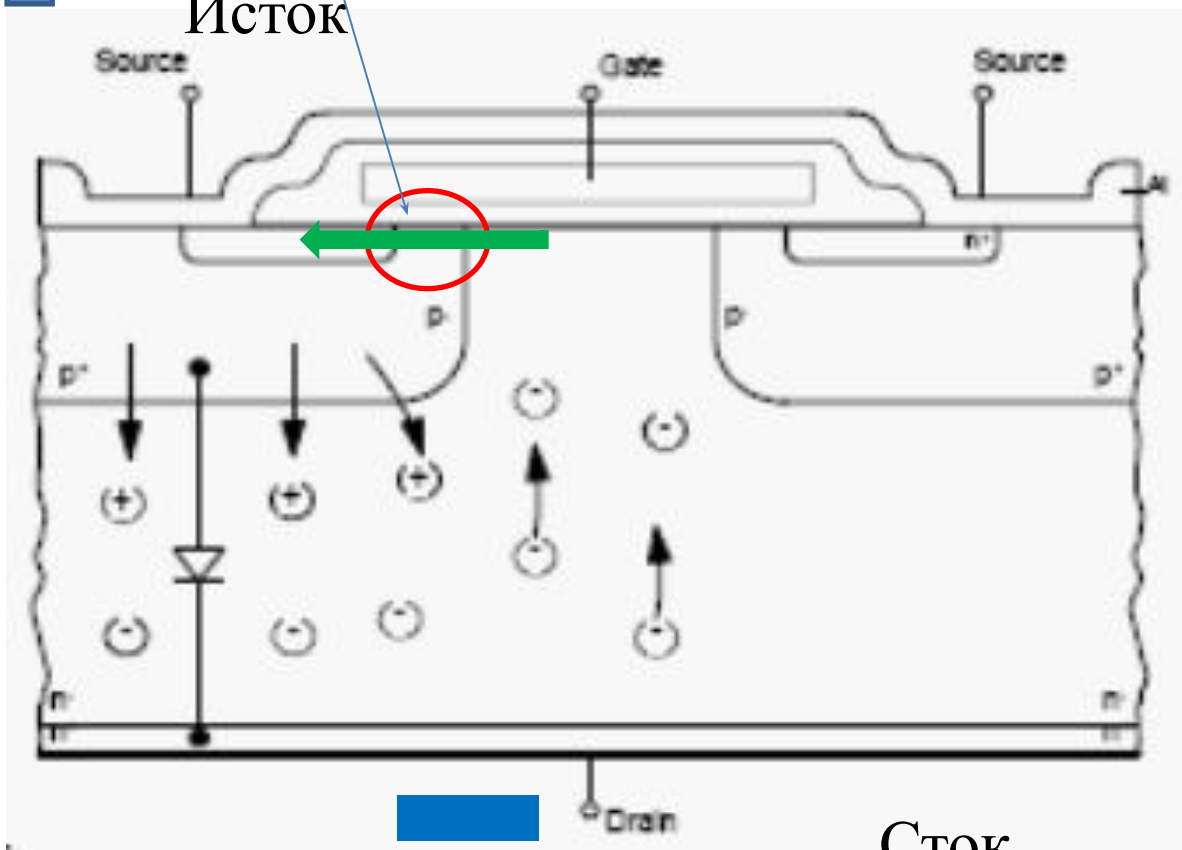
# Работа при обратном напряжении силового МДП ПТ **открытый канал** и малое отрицательное напряжение $V_{си}$ (полевой ток)



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



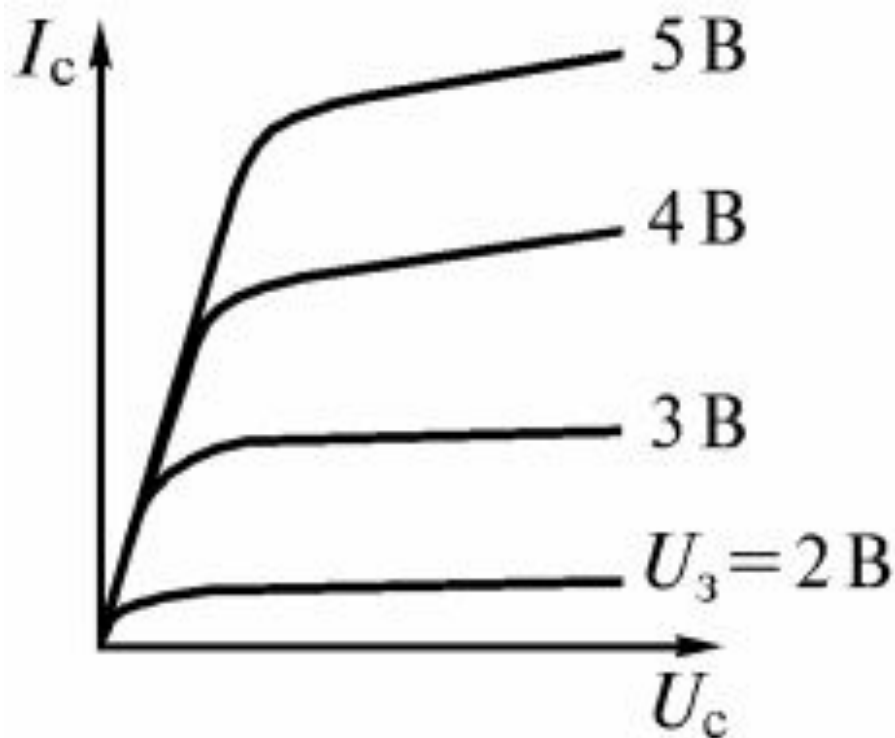
Исток



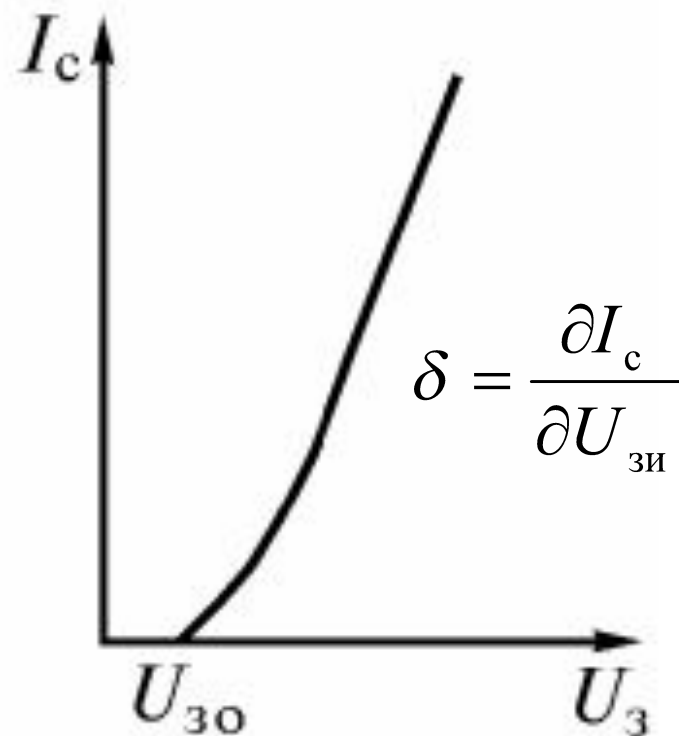
Сток



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



а)

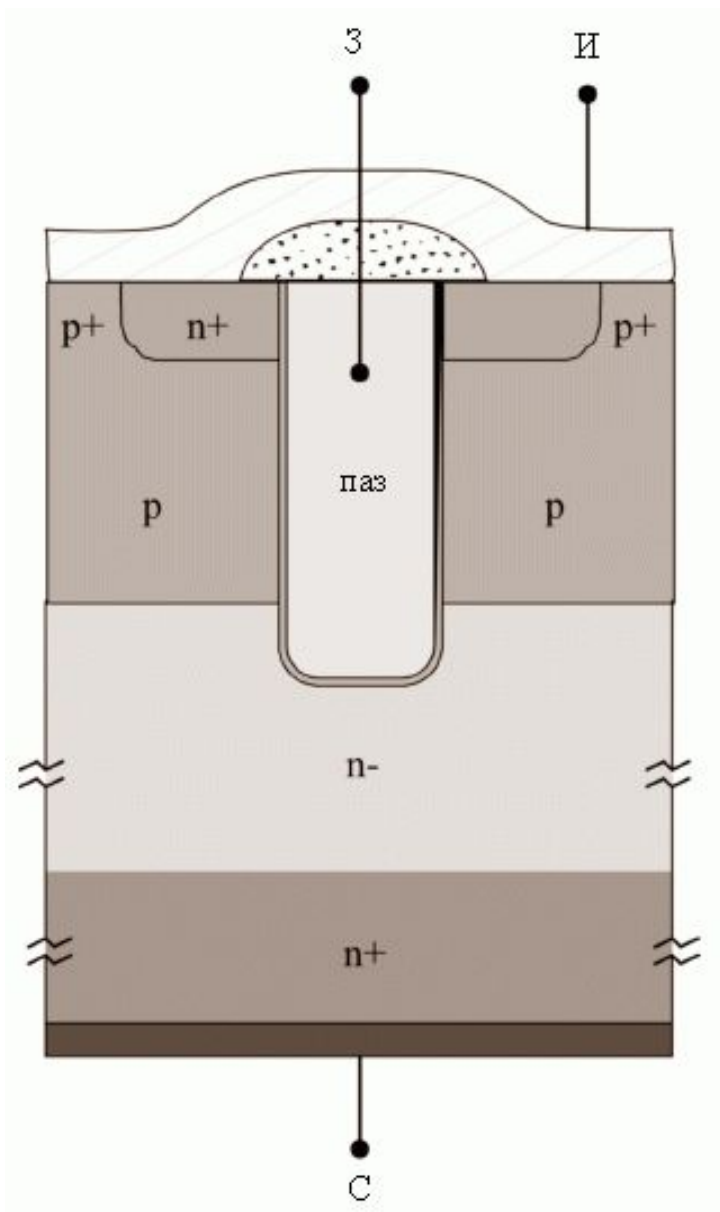


$$\delta = \frac{\partial I_c}{\partial U_{3и}}$$

б)

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).

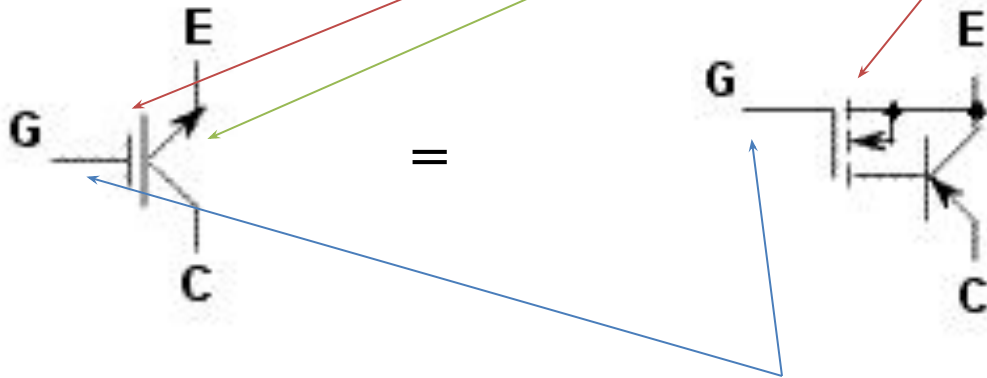
# Структура U-образного МОП-транзистора



# **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.

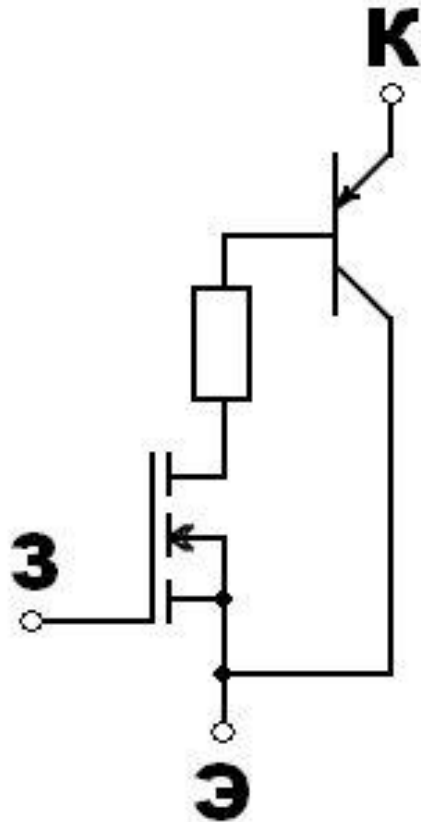
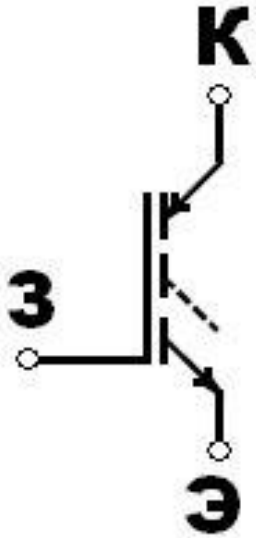
## Схематичное изображение внутренней структуры БТИЗ



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 –



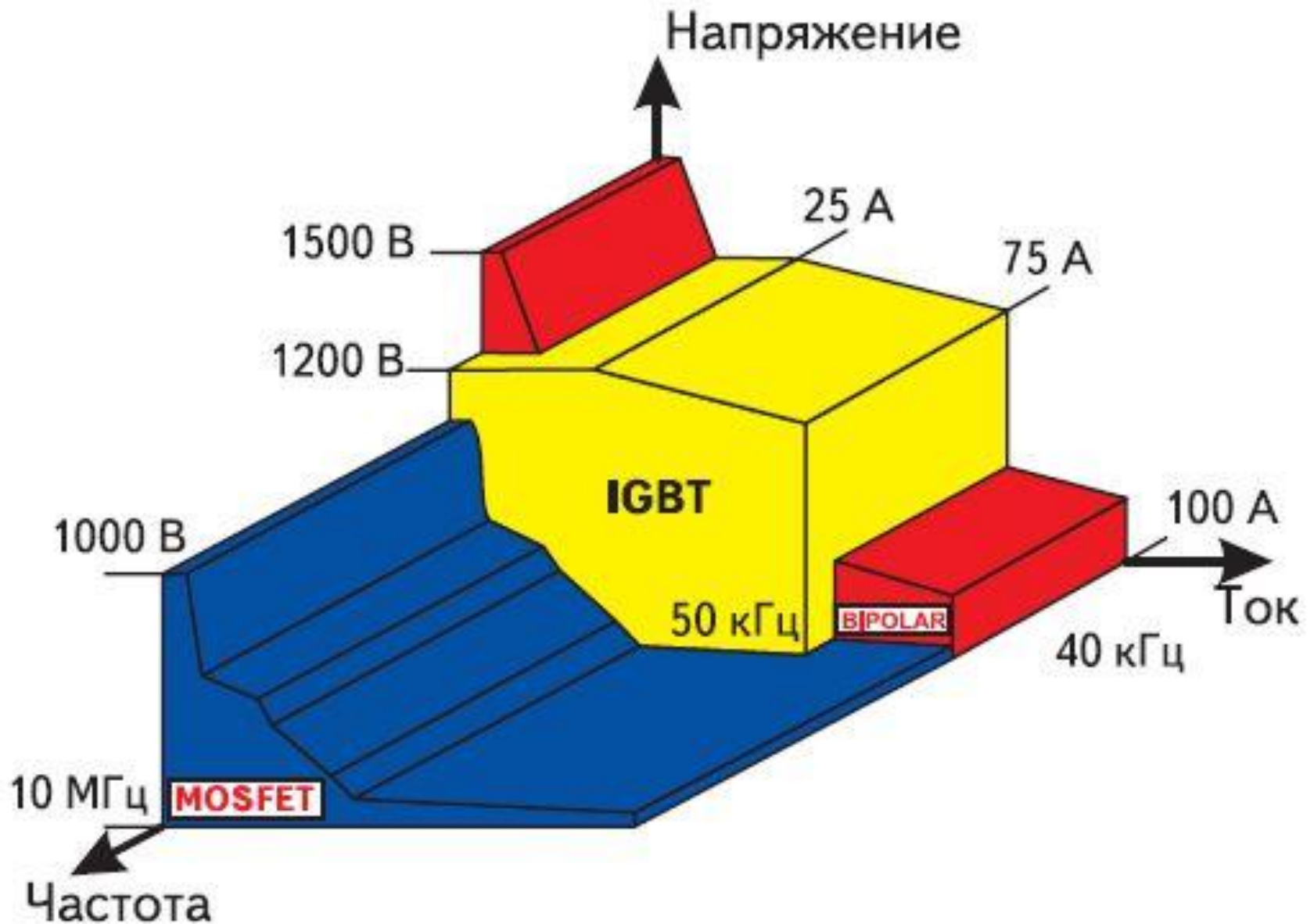
полностью управляемый п/п-ковый прибор, в основе которого трехслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком.

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 спадания тока при выключении IGBT находятся в диапазонах 0,2-0,4 и 0,2-1,5 мкс, соответственно.

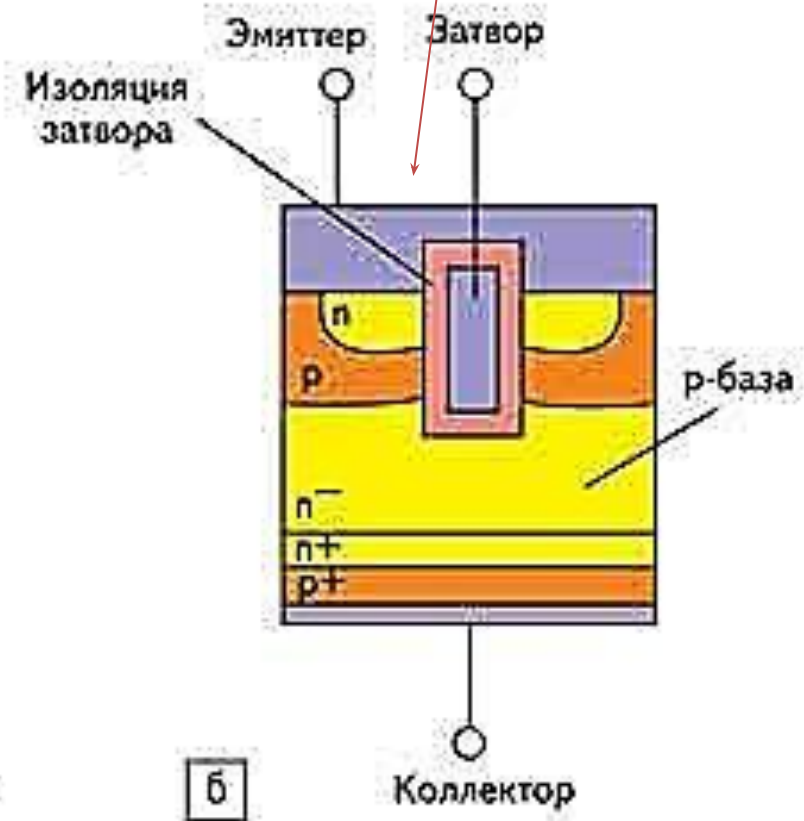
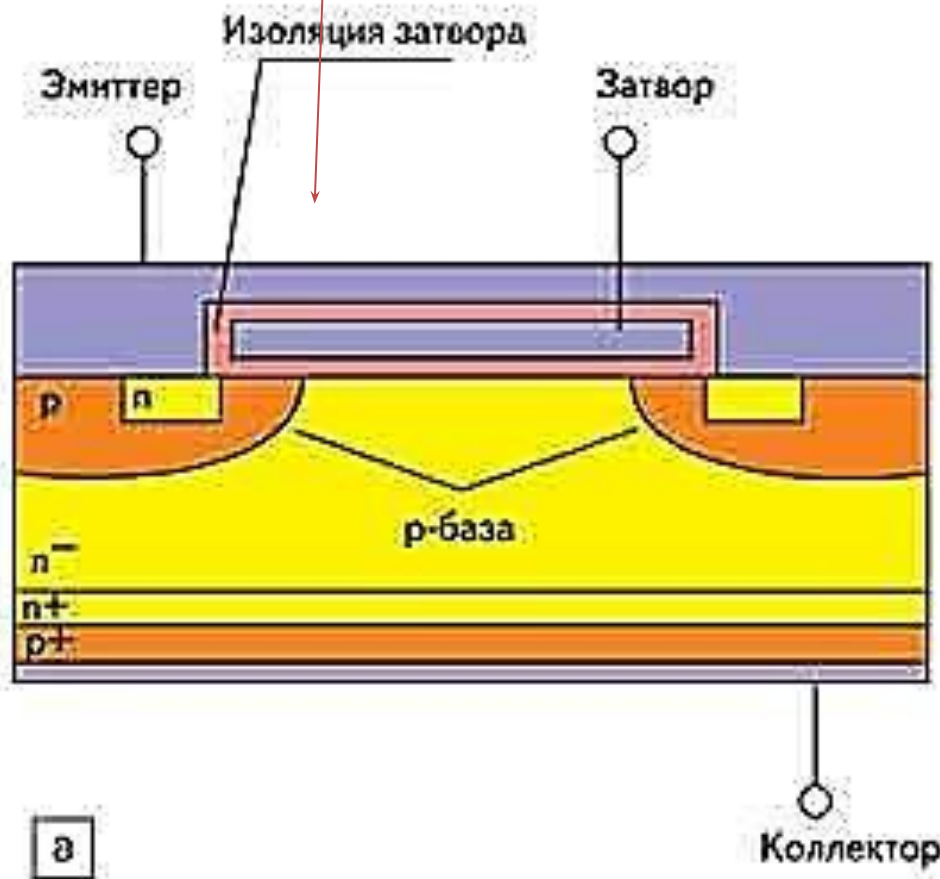
# Область применения IGBT



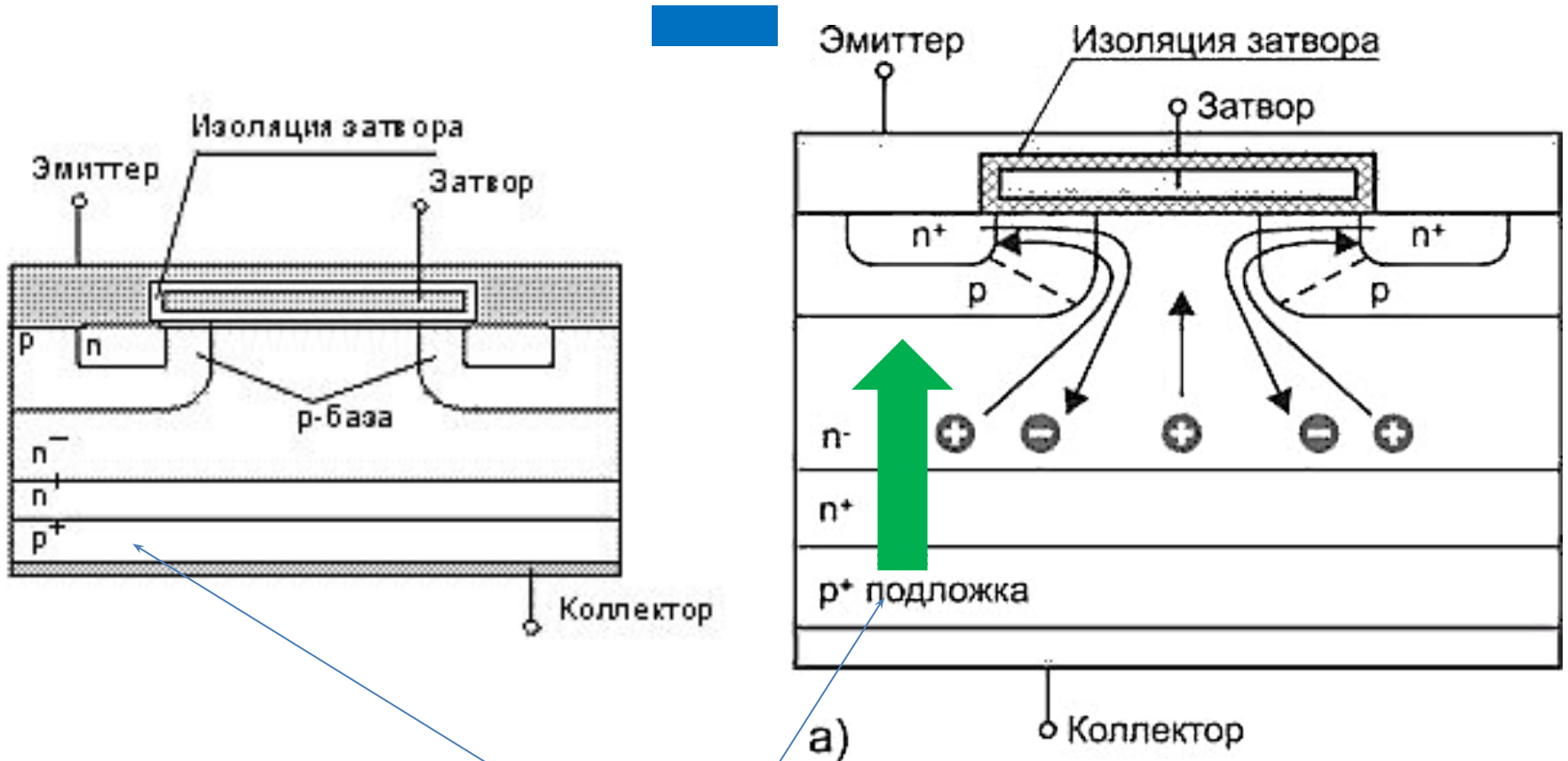


# Структуры IGBT

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

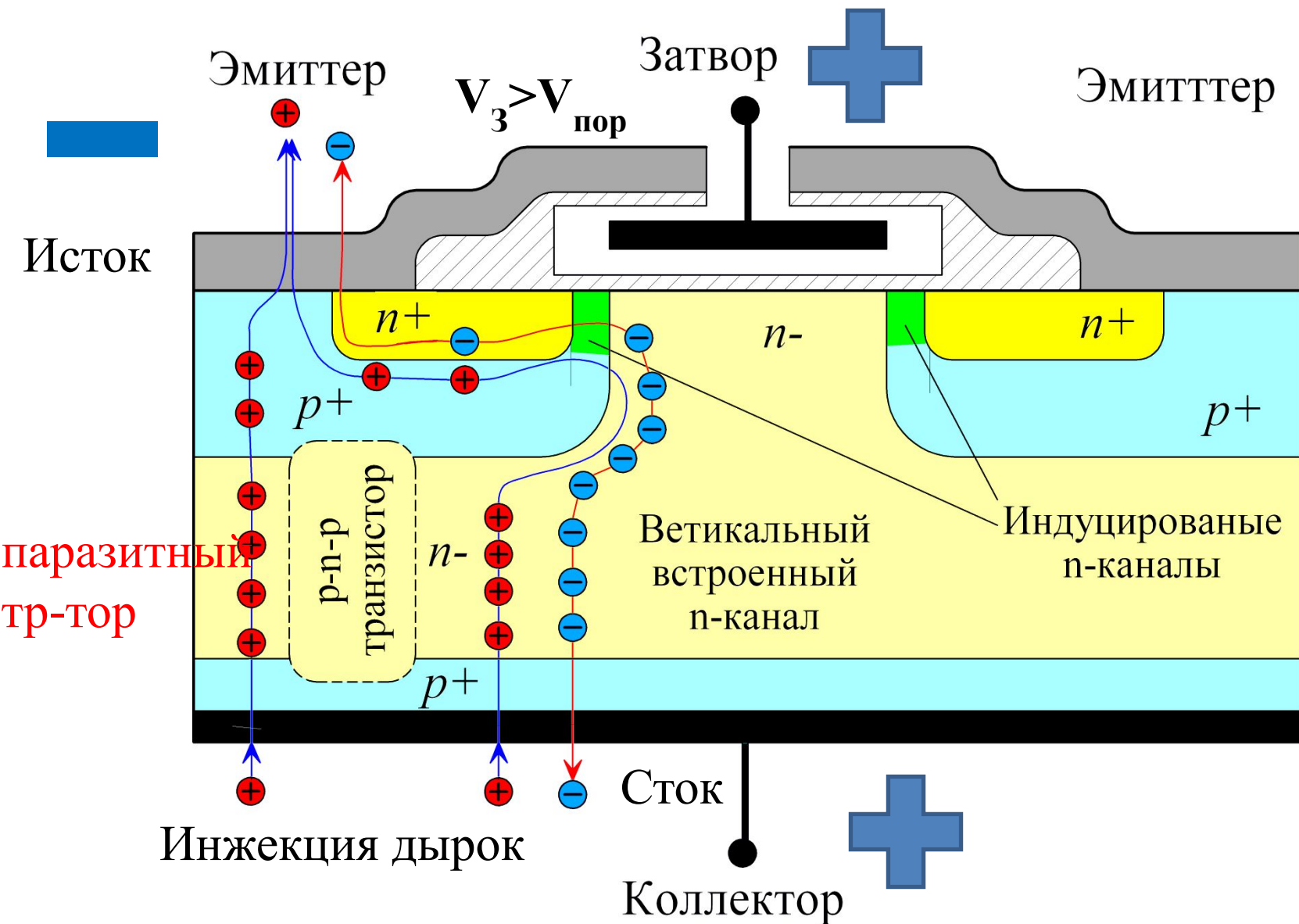


# Структура IGBT планарного типа



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

# СТРУКТУРА IGBT



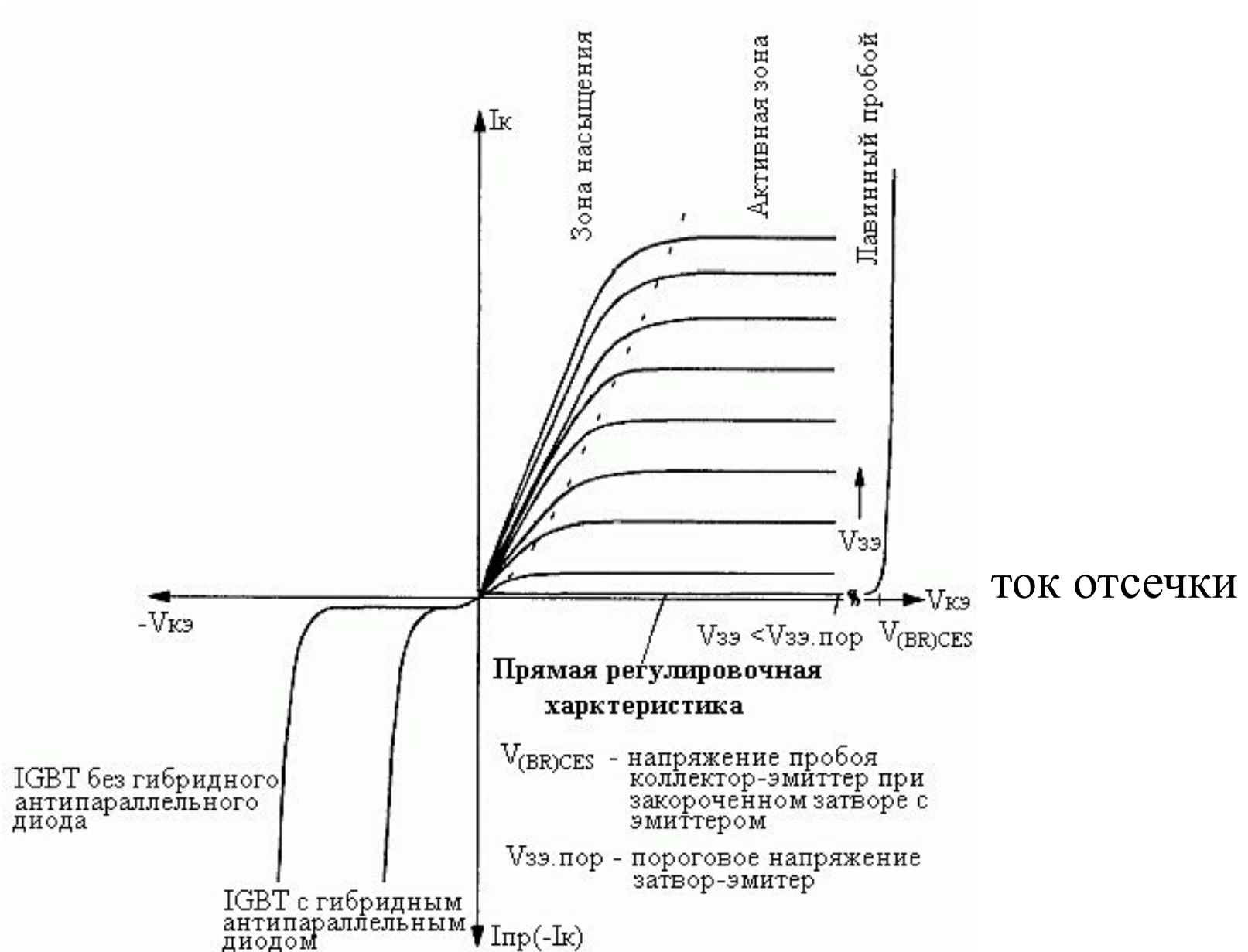
БТ образован слоями  $p^+$  (коллектор),  $n^-$  (база),  $p^+$  (эмиттер);

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

Затвор имеет вывод, включаемый в цепь управления.

При подаче на изолированный затвор  $V_3 > V_{пор}$ , 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



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  $V_{ZE}$  порогового  $V_{ZE(пор)}$ , токовое насыщение станет причиной значительного падения напряжения на канале (горизонтальная область на выходной характеристике). Ток коллектора  $I_K$  контролируется при помощи  $V_{ZE}$ .

*Крутизна* характеристики прямой передачи  $g$ :

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

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** быстровосстанавливающихся обратных диодов;
- применения прямого водяного охлаждения для исключения соединения основание - охладитель.



