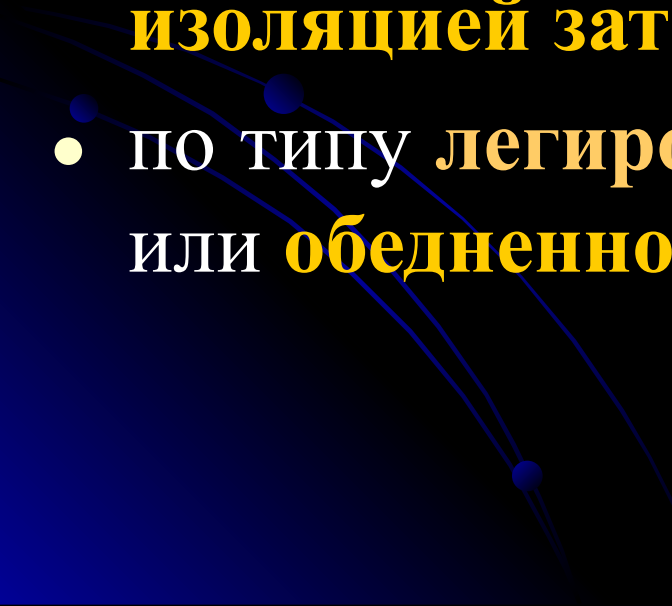


ПОЛЕВЫЕ (УНИПОЛЯРНЫЕ) ТРАНЗИСТОРЫ



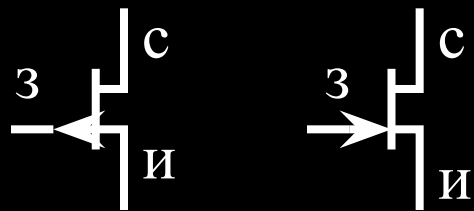
- **Полевой транзистор (ПТ)** – полупроводниковый усилительный прибор, которым **управляет не ток** (как биполярным транзистором), а **напряжение (электрическое поле, отсюда и название – полевой)**, осуществляющее **изменение площади** поперечного сечения проводящего **канала**, → в результате изменяется **электрическое сопротивление** канала и, как результат, → изменяется **выходной ток** транзистора.
- Управление электрическим полем предполагает **отсутствие входного тока**, что заметно **уменьшает мощность**, требуемую для управления транзистором.
- Полевой транзистор (ПТ) в отличие от биполярного иногда называют **униполярным**, так как его работа основана на использовании только основных носителей заряда – либо **электронов**, либо **дырок**.

- Проводящий слой, в котором создается рабочий ток транзистора, называют **каналом**.
- ПТ бывают двух полярностей: **n-канальные** (с проводимостью за счет **электронов**) и **p-канальные** (с **дырочной** проводимостью).
- **Управляющий электрод**, на который подается входной сигнал, у биполярных транзисторах называется **базой**, а у ПТ – **затвор**;
- Выводы, между которыми создается канал протекания тока, называются **сток** и **исток**;
- Электрод, в который **втекает ток** (у биполярных транзисторов – это **эмиттер**) у полевого транзистора называется – **исток**; электрод, через который **вытекает ток** (у биполярных транзисторов – это **коллектор**) у полевого транзистора называется – **сток**.

- Существует большое разнообразие полевых транзисторов:
 - по типу **проводимости** канала – ***n*-канальные** и ***p*-канальные**;
 - по виду **изоляции затвора** – с полупроводниковым ***p-n*-переходом** и с оксидной **изоляцией затвора**;
 - по типу легирования канала – **обогащенного** или **обедненного** типа.
- 

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С $p-n$ -ПЕРЕХОДОМ

- Условное графическое обозначение (**УГО**) полевых транзисторов (**ПТ**) с $p-n$ -переходом приведено на рис.

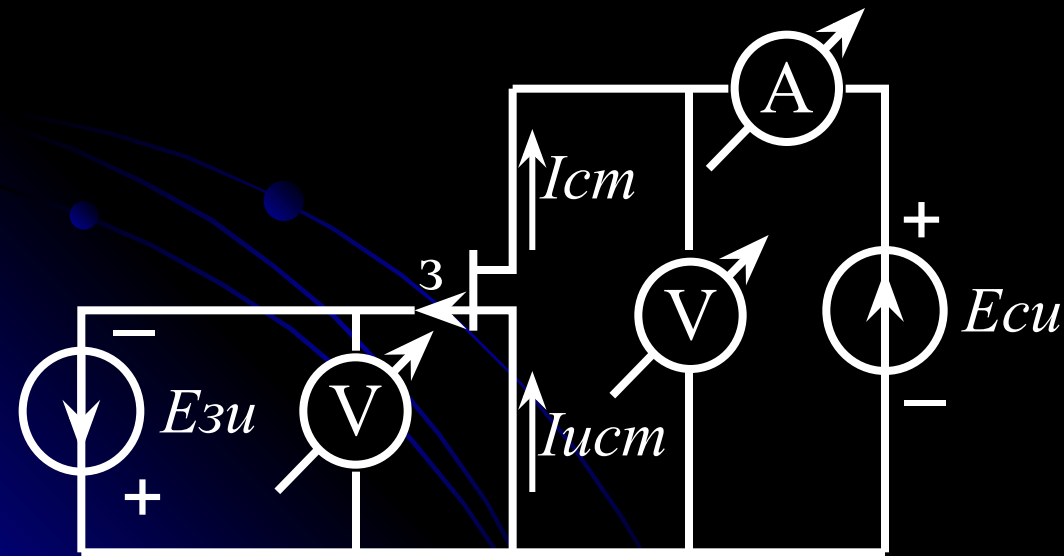


n-канальный *p*-канальный

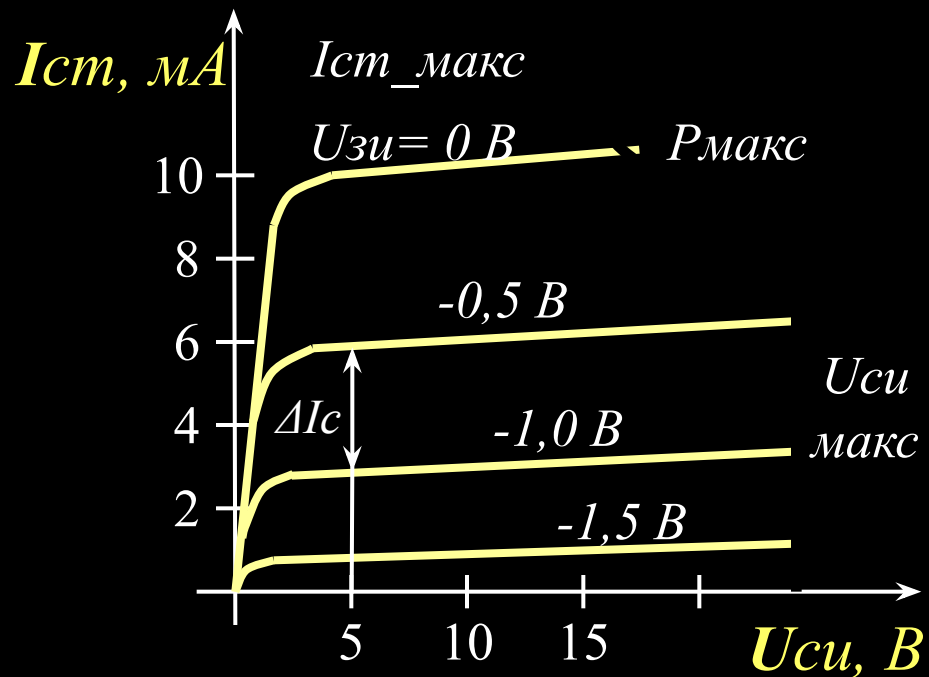
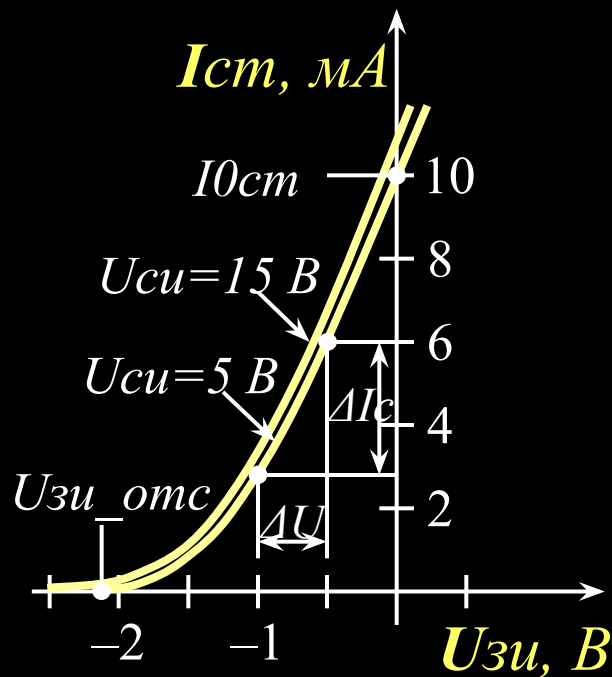
В полевом транзисторе с объемным каналом и изоляцией затвора $p-n$ -переходом эффективная площадь поперечного сечения канала меняется при изменении **электрического поля**, приложенного между затвором и основной массой полупроводника

Изменяющаяся **эффективная площадь** поперечного сечения канала приводит к **изменению сопротивления** канала.

- Поскольку входное напряжение прикладывается к $p-n$ -переходу в **обратном направлении**, то входной ток **закрытого $p-n$ -перехода** практически отсутствует.
- Поэтому входная **Вольт-Амперная характеристика** (зависимость **обратного тока затвора** от приложенного **напряжения затвор-исток**) не имеет практического смысла.



На рис. приведена схема для измерения **Вольт-Амперных характеристик n -канального** полевого транзистора.



Передаточная и выходная ВАХ полевого транзистора

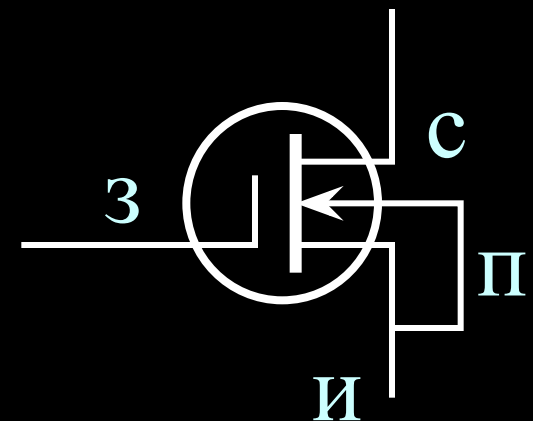
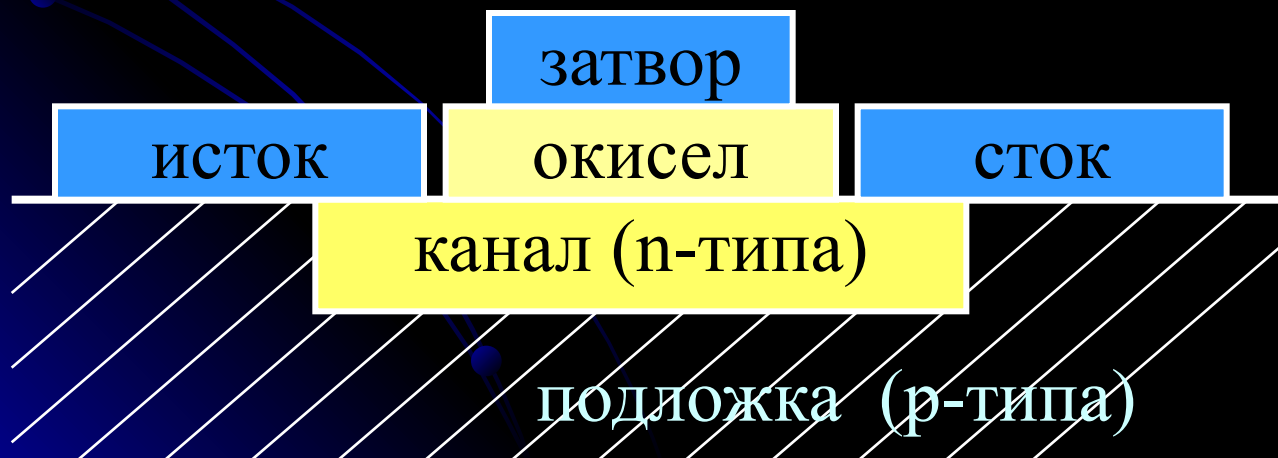
- На **передаточной ВАХ** отметим напряжение $U_{зи_отс}$ – точку отсечки, при которой **ток стока равен нулю**.
- $I_{0ст}$ – ток стока при нулевом напряжении $U_{зи} = 0$.
- По передаточной **ВАХ** можно определить **крутизну** полевого транзистора: $S = \Delta I_{ст} / \Delta U_{зи}$.

- Крутизна передаточной характеристики S численно равна **тангенсу угла наклона секущей**, проходящей через две точки (при постоянном напряжении $U_{си}$).
- При бесконечно малых приращениях напряжения $\Delta U_{си}$ и тока $\Delta I_{ст}$ крутизна равна **производной в рабочей точке ВАХ**.
- На основе анализа передаточной ВАХ полевого транзистора можно сделать вывод о том, что **вблизи точки отсечки** численные значения крутизны S **очень маленькие** и плавно **нарастают** при увеличении напряжения $U_{си}$ до нуля.

- **Выходная Вольт-Амперная** характеристика **полевого** транзистора напоминает **выходную ВАХ биполярного** транзистора.
- В качестве **параметра** на выходной ВАХ полевого транзистора указаны несколько значений входного напряжения затвор-исток **$U_{зи}$** .
- По **выходной ВАХ** можно также определить крутизну полевого транзистора при постоянном напряжении сток-исток (**$U_{си} = const$**).
- На рис. показано приращение тока стока (**$\Delta I_{ст} = 3,2$ мА**) (при постоянном напряжении **$U_{си} = 5$ В**).
- Вызвавшее его приращение входного напряжения **$\Delta U_{зи} 1,5 - 1,0 = 0,5$ В** (рассчитывается как разность указанных на ВАХ **параметров**).

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

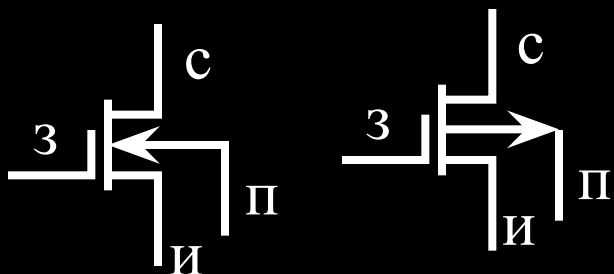
- Метод изоляции затвора **окисью кремния** (или **окисью гафния**) позволяет **исключить ток затвора** при любой полярности входного напряжения.
- Металлический **затвор** из кристаллического кремния или меди изолирован от **канала** тонким слоем изолятора
- Канал **n-типа** образован в поверхностном слое **подложки** с противоположной проводимостью **p-типа**.



- Такая структура транзистора – **М**еталлический затвор, изолятор на основе **О**киси кремния (или гафния) и **П**олупроводниковый канал прохождения тока – определяет название транзистора: ***n*-МОП** или ***p*-МОП** (в зависимости от типа проводимости канала).
- **Передаточная характеристика МОП** транзистора зависит от **степени легирования канала**, т.е. от количества введенных примесей, определяющих тип проводимости канала.
- Поэтому различают **МОП** транзисторы со ***встроенным каналом*** (сильно легированный или обогащенный канал) и **МОП** транзисторы с ***индуцированным каналом*** (малая степень легирования или обедненный канал).

- Такое разделение полевых МОП транзисторов отражено и в условных графических обозначениях:

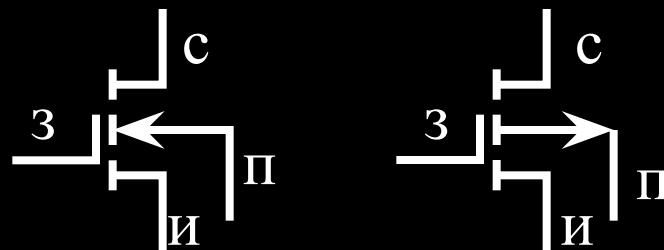
Встроенный канал



n-МОП

p-МОП

Индукцированный канал

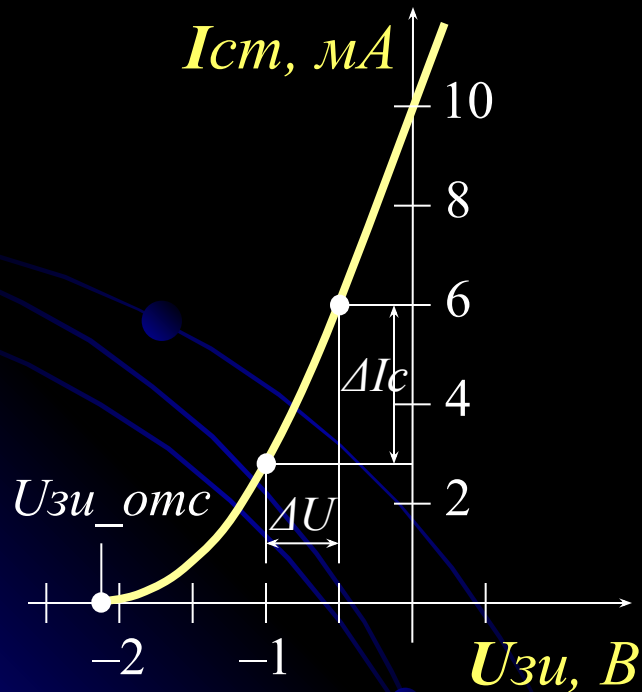


n-МОП

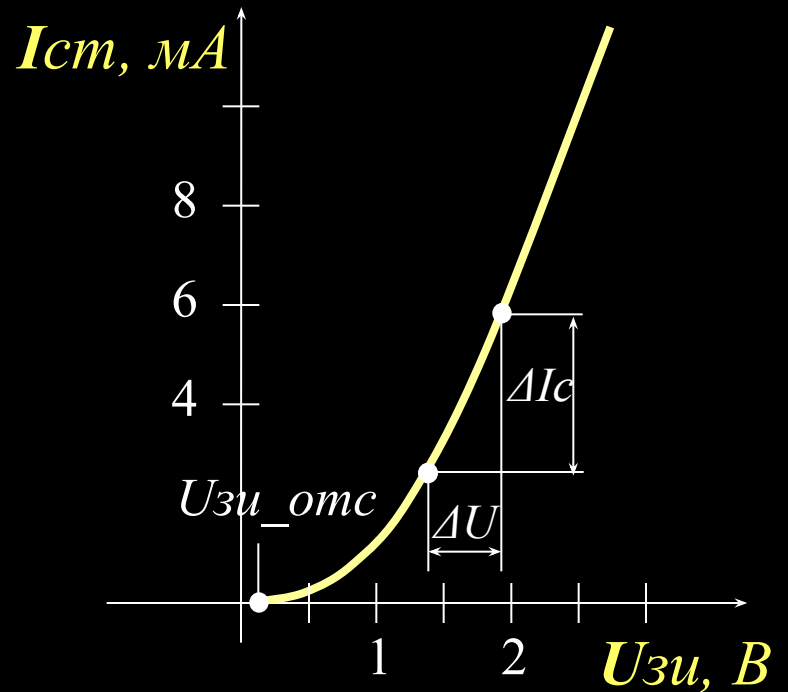
p-МОП

У МОП транзисторов **со встроенным каналом** передаточная и выходная **ВАХ** подобны аналогичным характеристикам для полевого транзистора с изоляцией затвора ***p-n-переходом***

- У **МОП** транзисторов с **индуцированным каналом** передаточная характеристика сдвинута **вправо**, в область **положительных значений** входного напряжения $U_{зи}$.
- Входное напряжение отсечки $U_{зи_отс}$ имеет положительное значение (для **МОП** транзисторов с каналом **n-типа**).



Встроенный канал



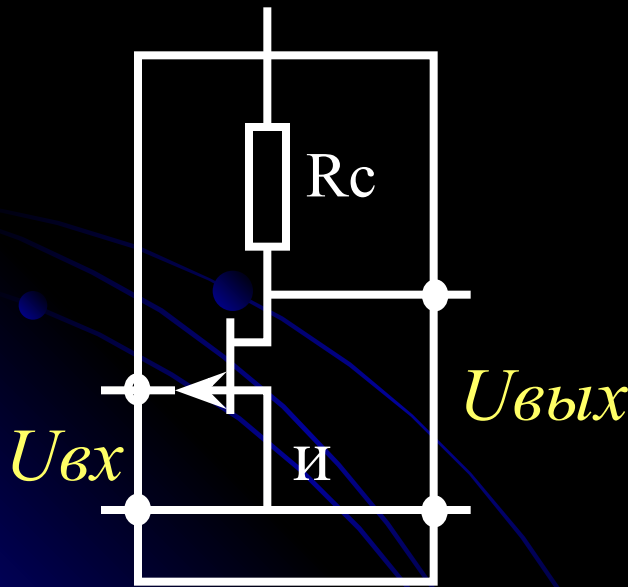
Индукцированный канал

- Поэтому в литературе встречается название: **МОП** транзисторы **со встроенным каналом** имеют «левую» передаточную характеристику, т.е. рабочие входные напряжения $U_{зи}$ расположены **левее** вертикальной оси координат, а
- **МОП** транзисторы с **индуцированным каналом** имеют «правую» передаточную характеристику, т.е. рабочие входные напряжения $U_{зи}$ расположены **правее** вертикальной оси.
- На выходной характеристике **МОП** транзисторов с **индуцированным каналом** (эта ВАХ аналогична выходной характеристике на для ПТ с изоляцией затвора *p-n*-переходом), но значения параметров $U_{зи}$ имеют нарастающие **положительные значения.**

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

- По аналогии с **биполярными** транзисторами можно нарисовать **три схемы** включения **полевых транзисторов**:
- с общим **истоком** – **ОИ** (аналогичная схеме с общим эмиттером – **ОЭ**),
- с общим **затвором** – **ОЗ** (аналогичная схеме с общей базой – **ОБ**) и
- с общим **стоком** – **ОС** (аналогичная схеме с общим коллектором – **ОК**).

- В схеме с **ОИ** входное переменное напряжение $U_{вх}$ подается между **затвором** и **истоком** (подложка обычно соединяется с **истоком**).
- Входной ток **отсутствует**, поэтому входные статическое и дифференциальное сопротивления **очень большие**.

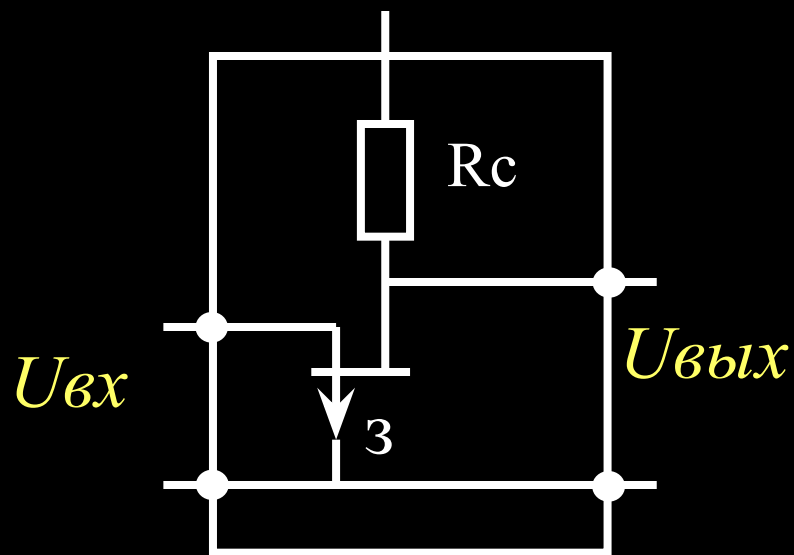


- Выходное напряжение $U_{вых}$ в схеме с **ОИ** снимается параллельно выводам канала – **сток**, **исток**.
- В схеме с **ОИ** выходное дифференциальное сопротивление $R_{вых_диф} = \Delta U_{си} / \Delta I_{ст}$ полевого транзистора может быть от **десятков** до **сотен кОм**.

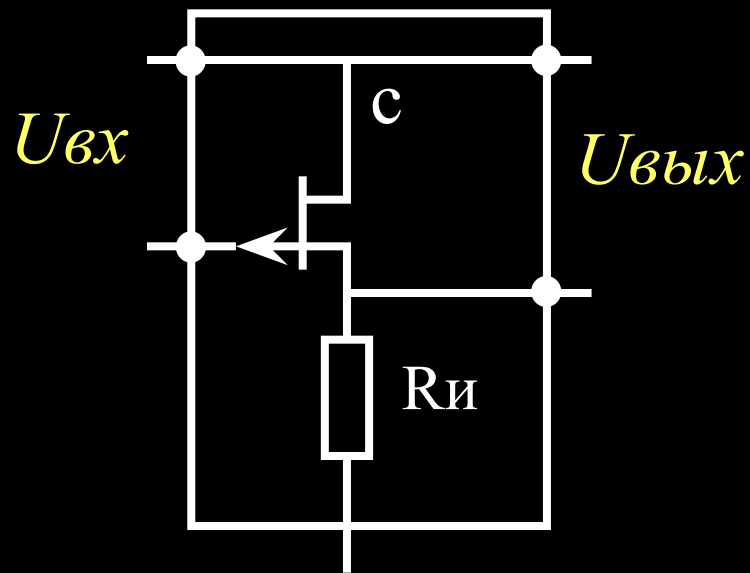
- При расчете **коэффициента усиления по напряжению** в схеме с **ОИ** необходимо учесть, что приращение выходного напряжения $\Delta U_{си}$ определяется изменениями падением напряжения на резисторе R_c за счет изменения выходного тока стока $\Delta I_{ст}$:

$$\Delta U_{вых} = \Delta U_{си} = \Delta I_{ст} \cdot R_c.$$

- В этой формуле присутствует крутизна передаточной характеристики S , значение которой имеет большой **технологический разброс** даже для транзисторов одного типа.
- Схема с **ОИ**, как и аналогичная схема с **ОЭ**, **инвертирует** входной сигнал, т.е. фаза входного и выходного напряжения сдвинуты на **180°**.
- Из-за **отсутствия входного тока** коэффициент усиления по току в схеме с **ОИ** стремится к бесконечности: $k_I = \Delta I_{ст} / \Delta I_{вх} \rightarrow \infty$.



- Схема с **ОЗ** используется редко из-за очень **маленького входного сопротивления**.
- Основное применение схемы с **ОЗ** – это **источники тока**, обладающие **большим выходным сопротивлением**.



- Схема с **ОС** используется в **МОЩНЫХ ВЫХОДНЫХ каскадах**, в которых необходимо минимальное выходное сопротивление.