

Полевые транзисторы

(**FET**: Field-Effect-Transistors)

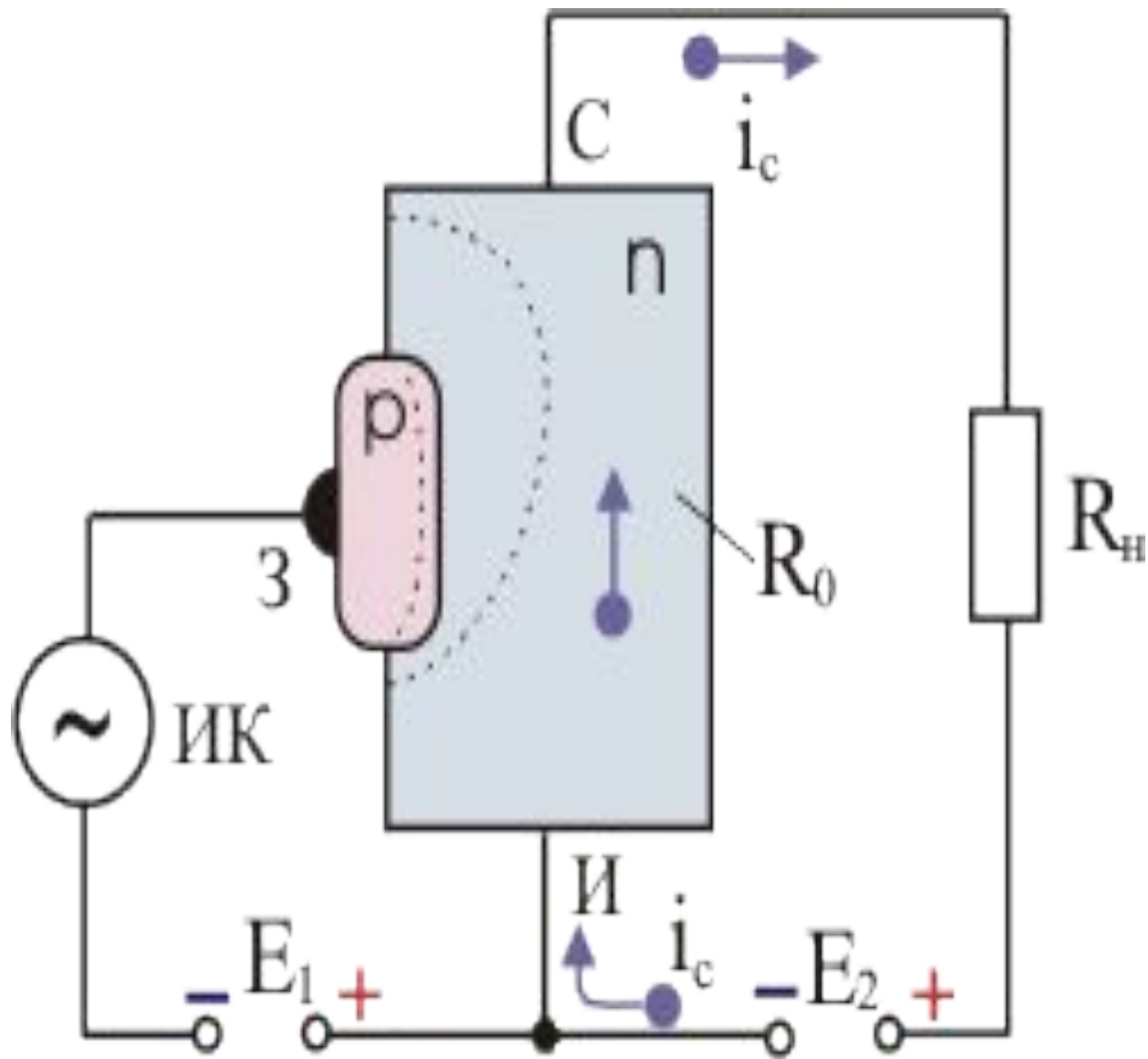
разделяются на два типа – *полевой транзистор с управляющим PN-переходом* (**JFET**: Junction-FET)

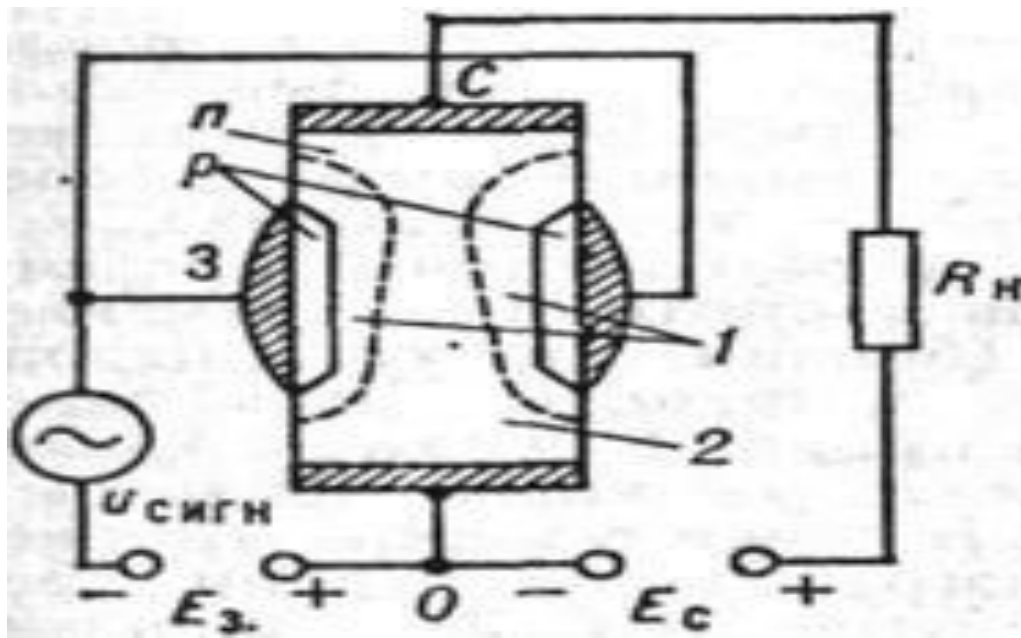
и *полевой транзистор с изолированным*

затвором (**MOSFET**: Metal-Oxid-Semiconductor-FET).

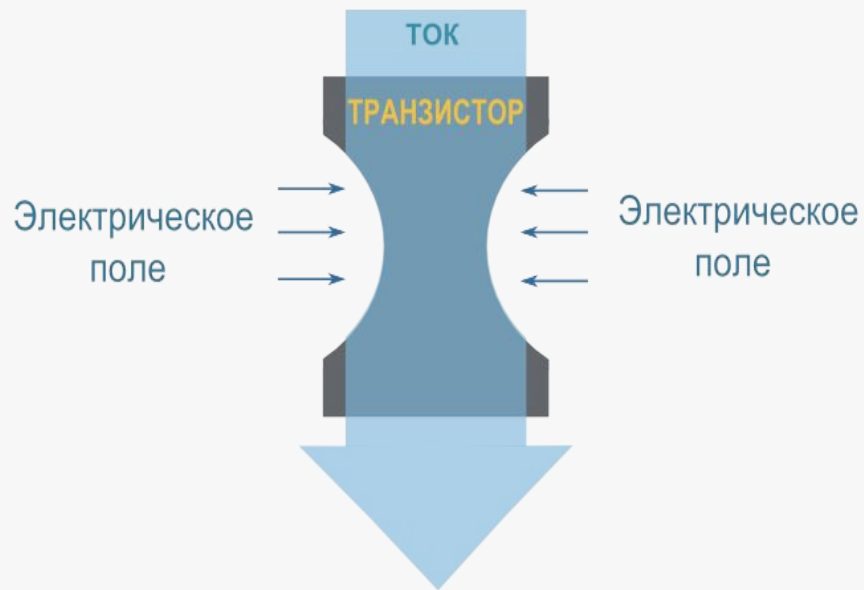
Главным достоинством этих транзисторов является высокое входное сопротивление (как у ламп и даже больше).

Пластинка из полупроводника имеет на противоположных концах электроды, с помощью которых она включена в выходную (управляемую) цепь усилительного каскада. Эта цепь питается от источника E_2 и в нее включена нагрузка R_H . Вдоль транзистора проходит ток основных носителей (в нашем случае электронный ток). Входная (управляющая) цепь транзистора образована при помощи третьего электрода, являющейся областью с другим типом электропроводности (в нашем случае это p-область). Источник E_1 создает на единственном p-n-переходе обратное напряжение. Прямое напряжение на переход не подается, поскольку тогда входное сопротивление транзистора будет очень малым. Во входную цепь включен источник усиливаемых колебаний ИК.

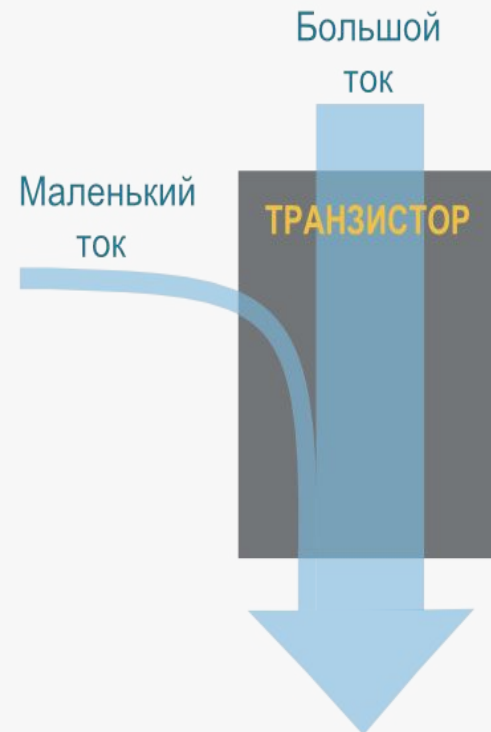




Принципиальная схема включения полевого транзистора: 1 - области объёмного заряда p - n-переходов; 2- канал; C - сток; 3 - затвор; $U_{\text{сигн}}$ - напряжение сигнала; $R_{\text{н}}$ - нагрузочный резистор; $E_{\text{з}}$ и $E_{\text{с}}$ - постоянные напряжения соответственно в цепях затвора и стока. Источник полевого транзистора подключён к общей точке O электрических цепей



Принцип действия
полевого транзистора



$$\text{Большой ток} = \text{Маленький ток} * \text{Коэффициент усиления}$$

Принцип действия
биполярного транзистора

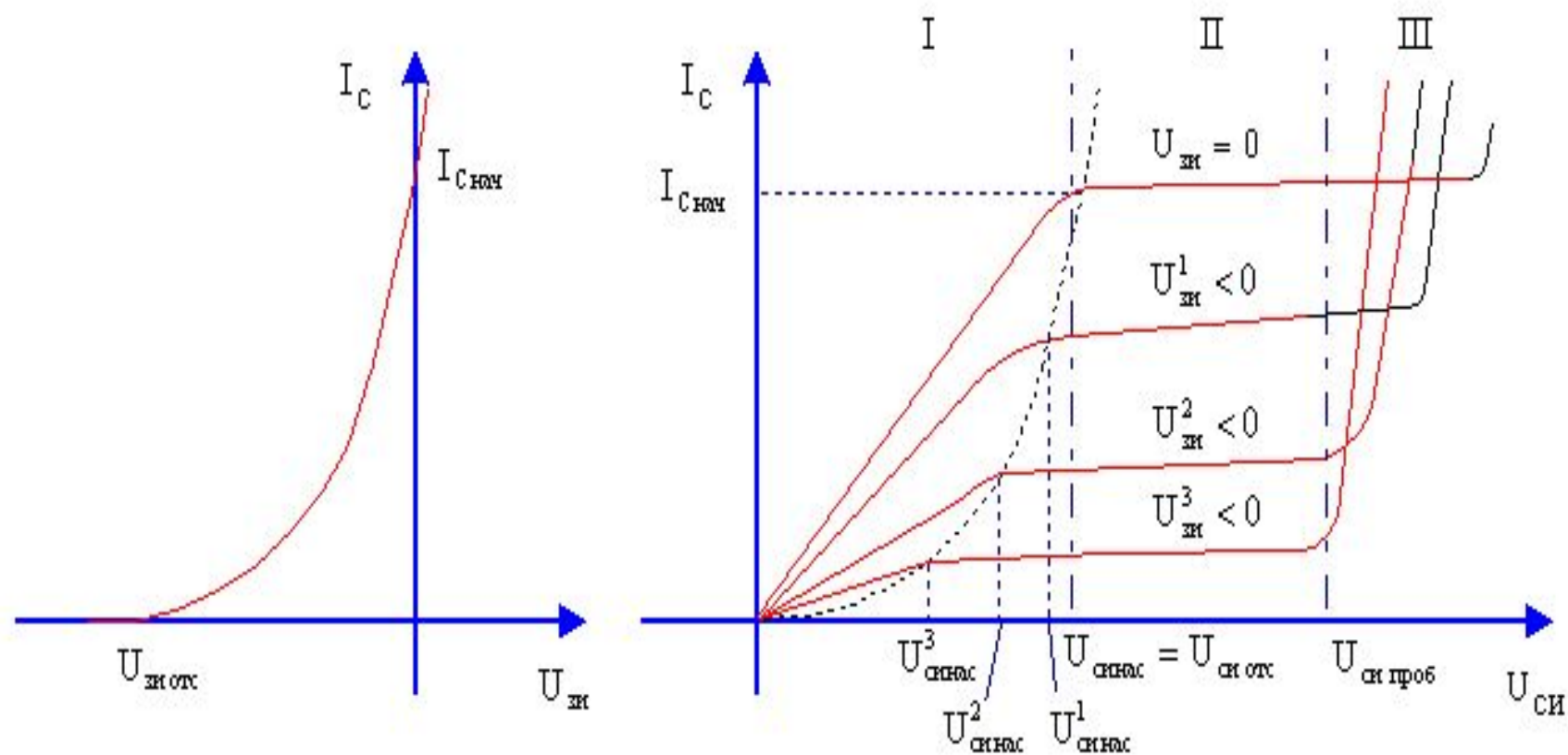
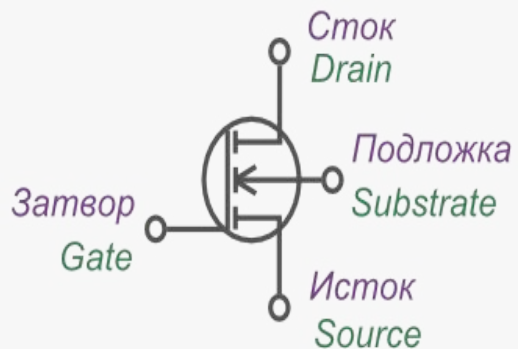
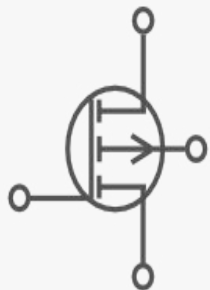


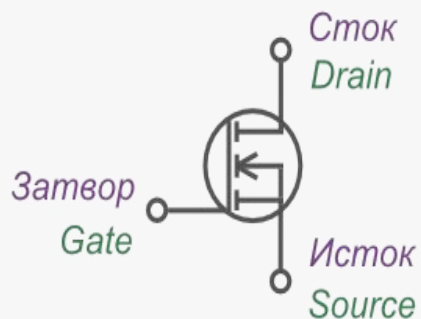
Рис. 4. Характеристики полевого транзистора с управляющим р - п переходом
 а) передаточная характеристика
 б) выходные характеристики



N-канал



P-канал

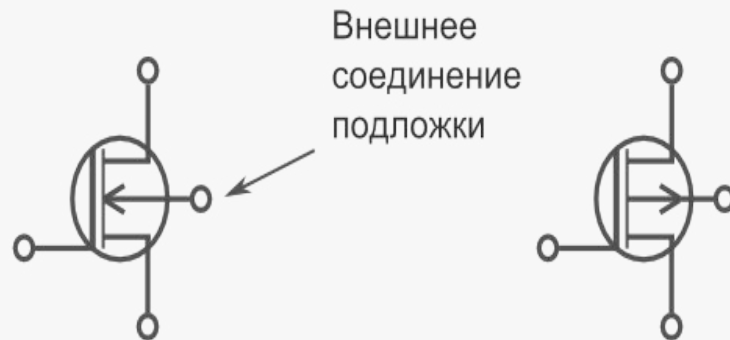


N-канал

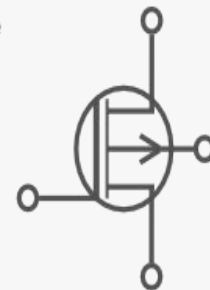


P-канал

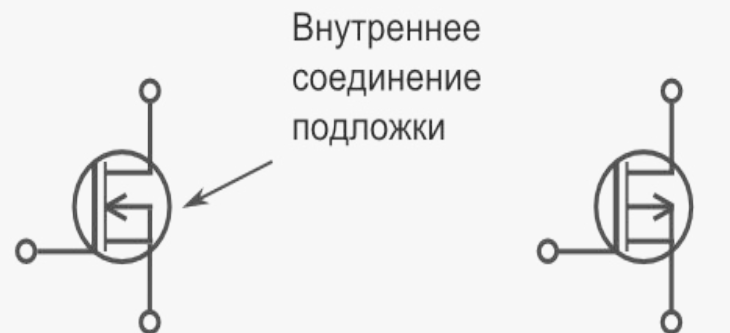
Обозначение на схеме MOSFET
с индуцированным каналом



N-канал



P-канал

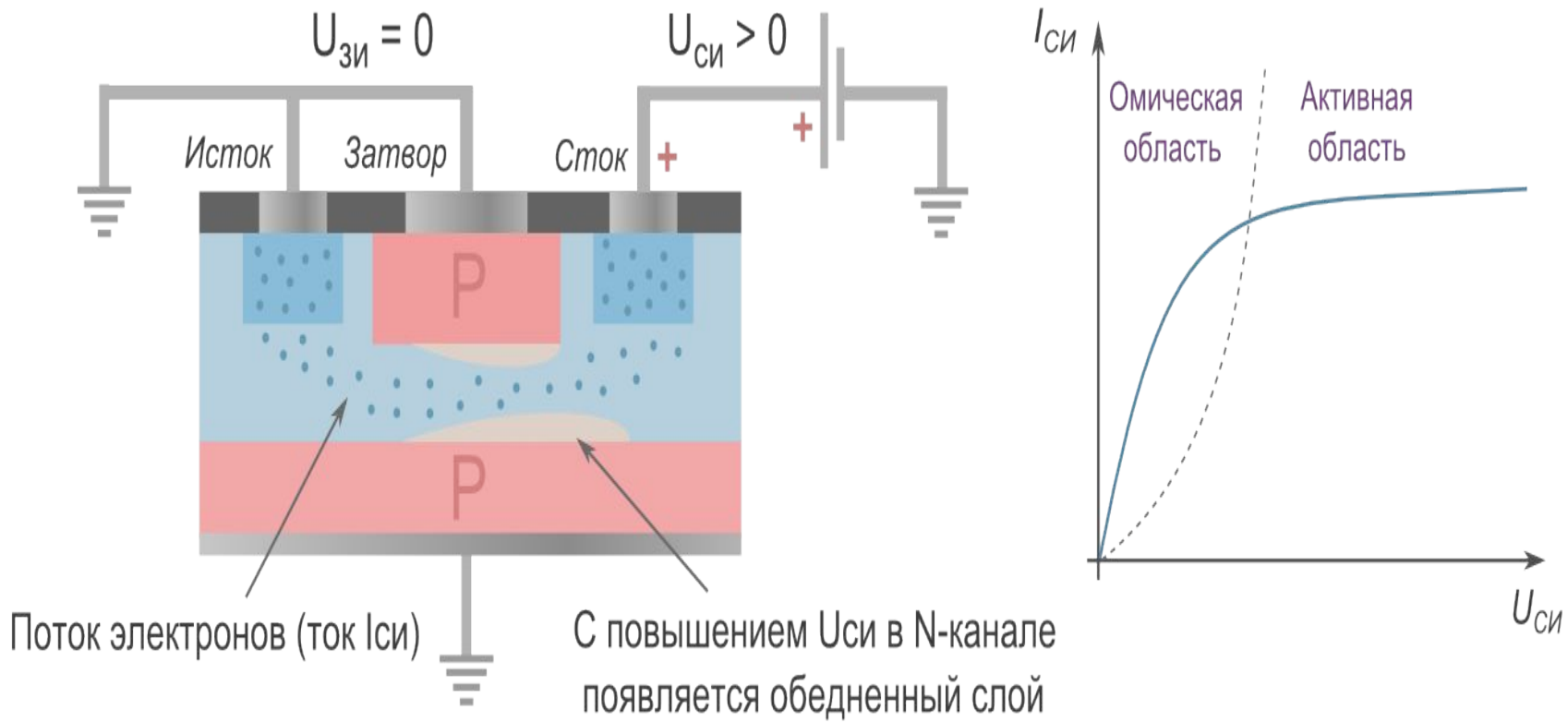


N-канал

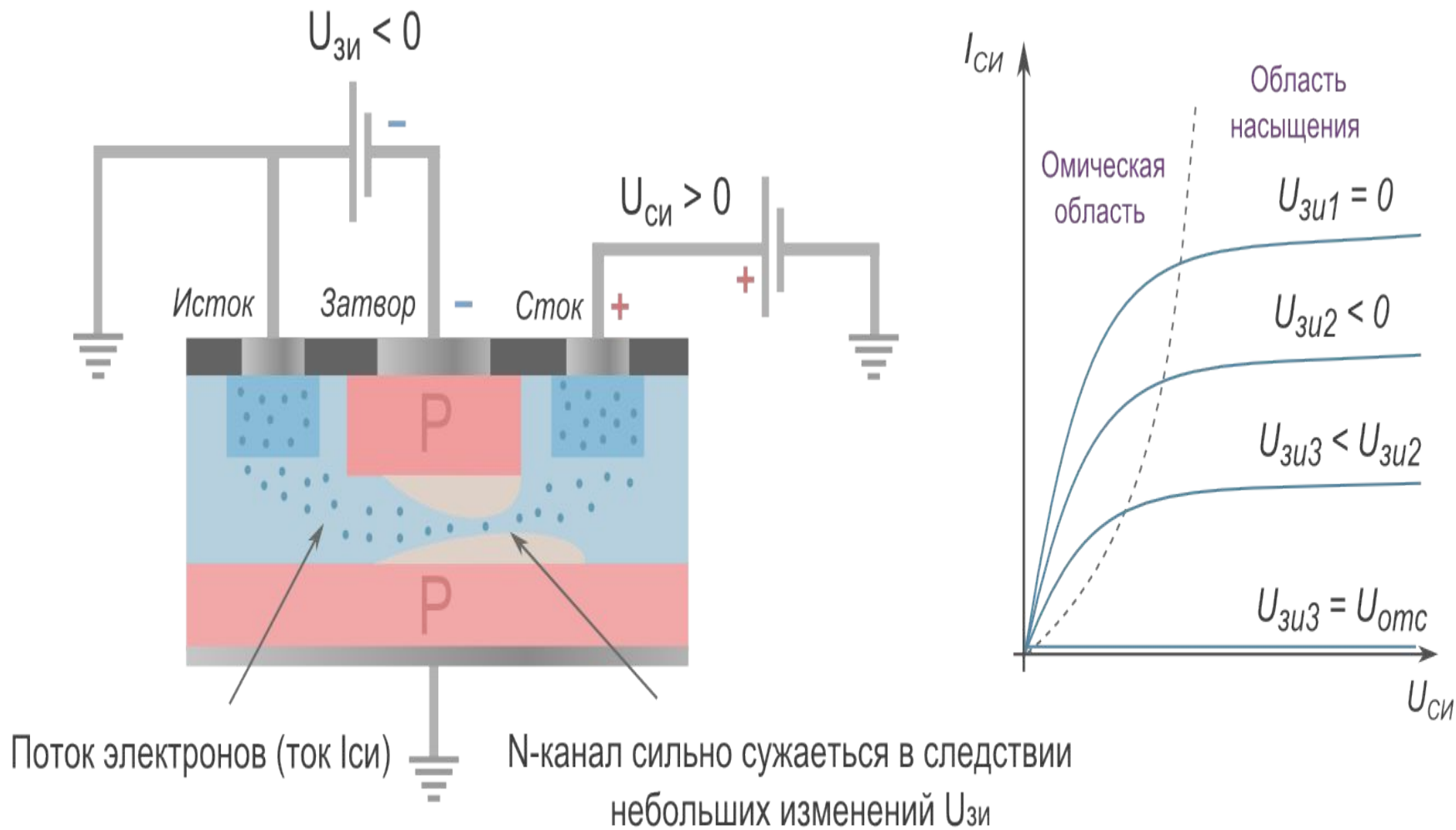


P-канал

Обозначение на схеме MOSFET
со встроенным каналом



Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} = 0$



Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} < 0$

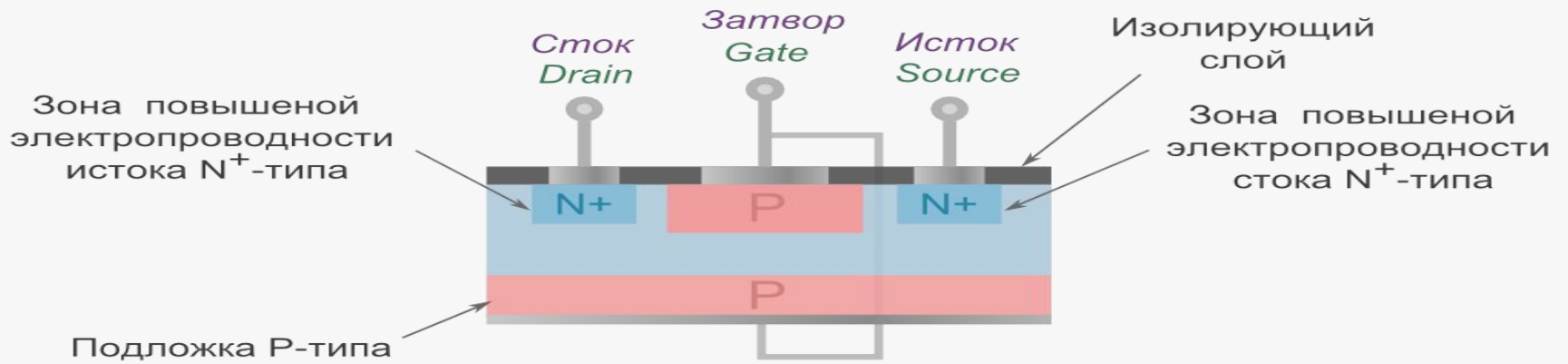
. Напряжение на затворе $U_{зи} = 0$

Подключим источник положительного напряжения к стоку, землю к истоку. Затвор также подсоединим к земле ($U_{зи} = 0$). Начнем постепенно повышать напряжение на стоке $U_{си}$. Пока $U_{си}$ низкое, ширина канала максимальна. В таком состоянии полевой транзистор ведет себя как обычный проводник. Чем больше напряжение между стоком и истоком $U_{си}$, тем больше ток через канал между стоком и истоком $I_{си}$. Это состояние еще называют *омическая область*.

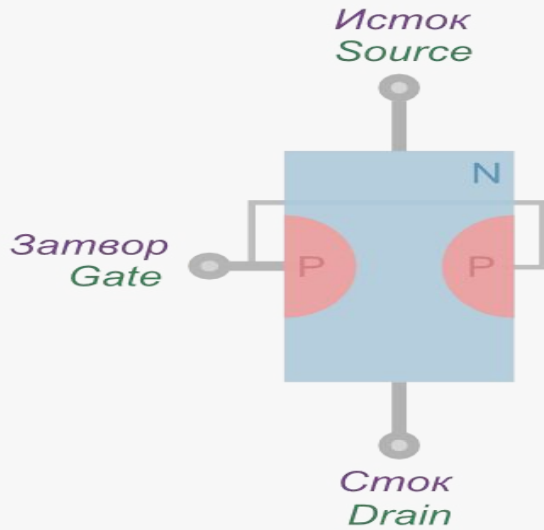
При повышении $U_{си}$, в полупроводнике N-типа в зонах PN-перехода постепенно снижается количество свободных электронов – появляется обедненный слой. Этот слой растет несимметрично – больше со стороны стока, поскольку туда подключен источник напряжения. В результате канал сужается настолько, что при дальнейшем повышении $U_{си}$, $I_{си}$ будет расти очень незначительно. Это состояние называют *режим насыщения*.

Напряжение на затворе $U_{зи} < 0$

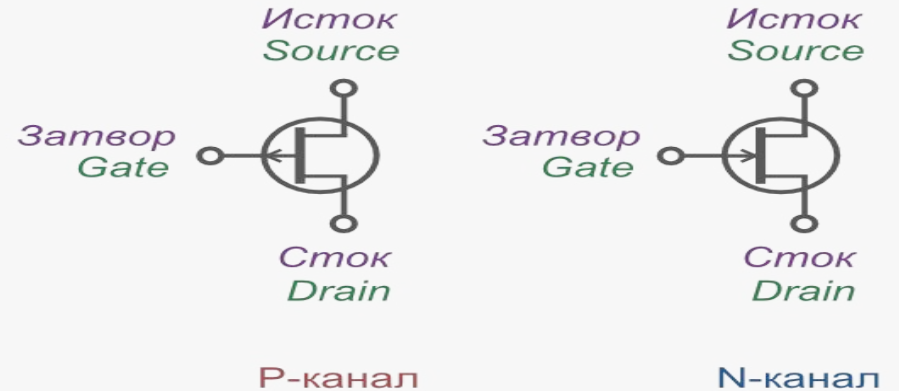
Когда транзистор находится в режиме насыщения, канал относительно узкий. Достаточно подать небольшое отрицательное напряжение на затвор $U_{зи}$, для того чтобы еще сильнее сузить канал и значительно уменьшить ток $I_{си}$ (для транзистора с P-каналом на затвор подается положительное напряжение). Если продолжить понижать $U_{зи}$, канал будет сужаться, пока полностью не закроется, и ток $I_{си}$ не прекратится. Значение $U_{зи}$, при котором ток $I_{си}$ останавливается, называется напряжением отсечки ($U_{отс}$).



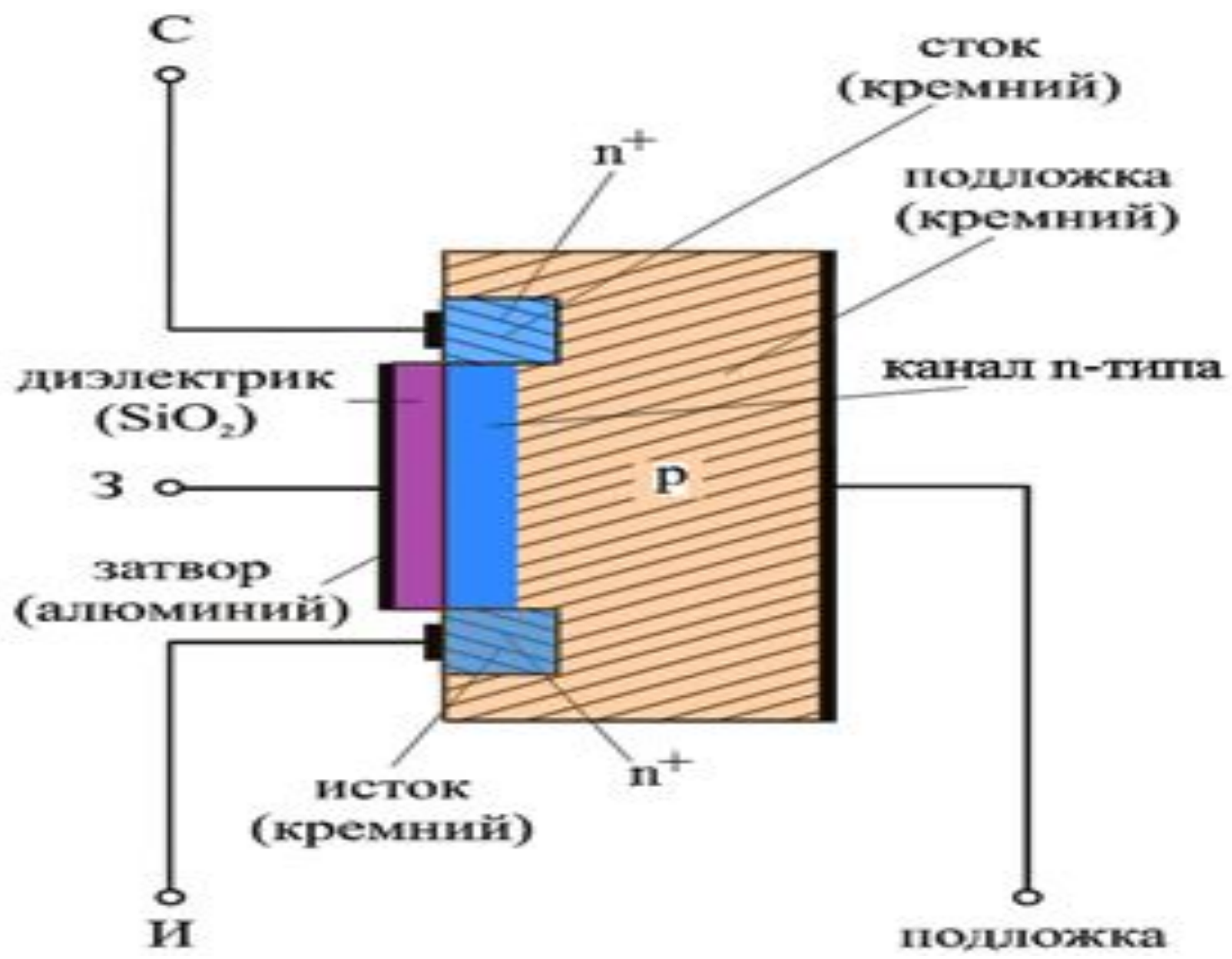
Устройство JFET транзистора

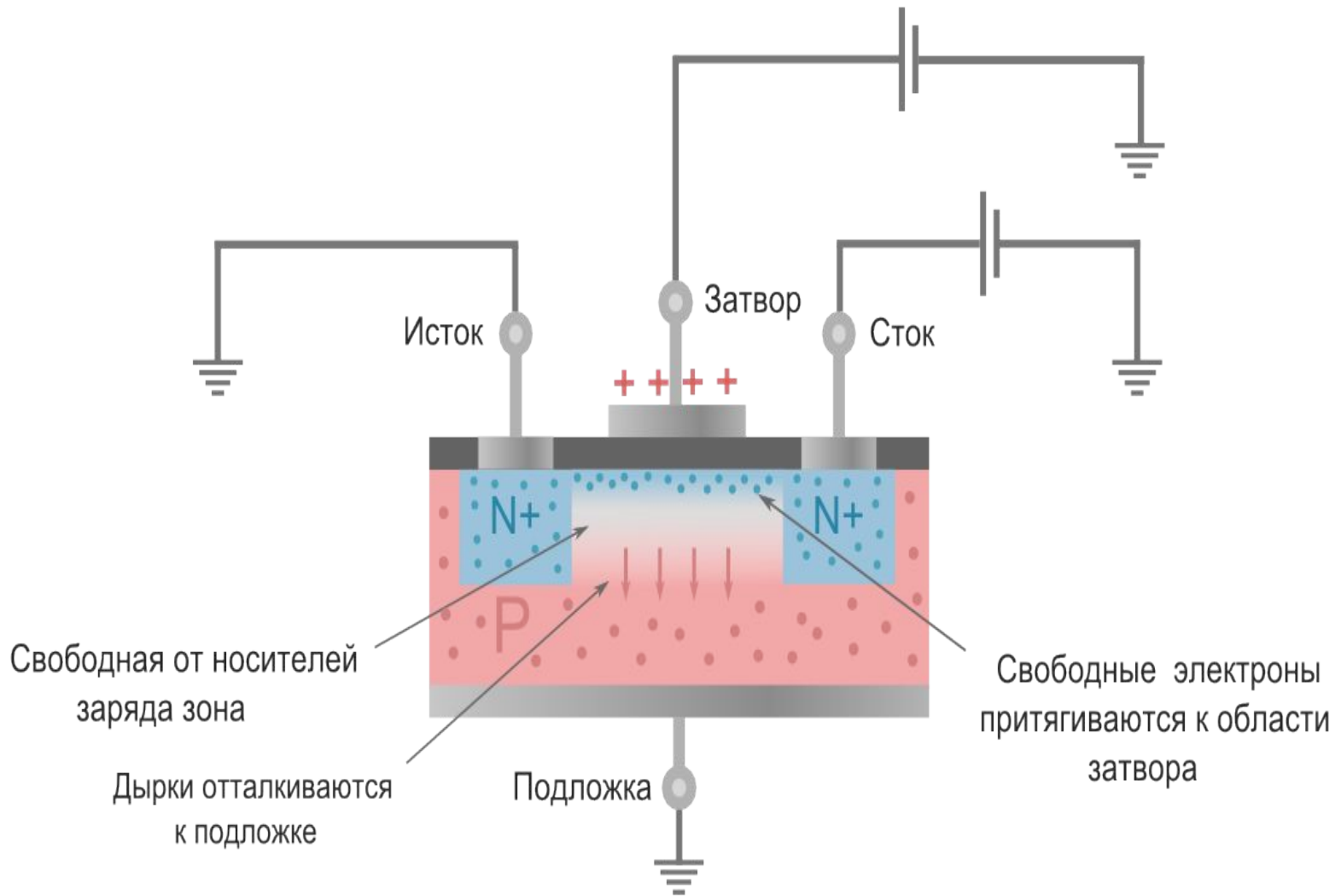


Упрощенная модель JFET транзистора



Обозначение на схеме JFET транзистора





Работа МДП-транзистора
с индуцированным каналом N-типа

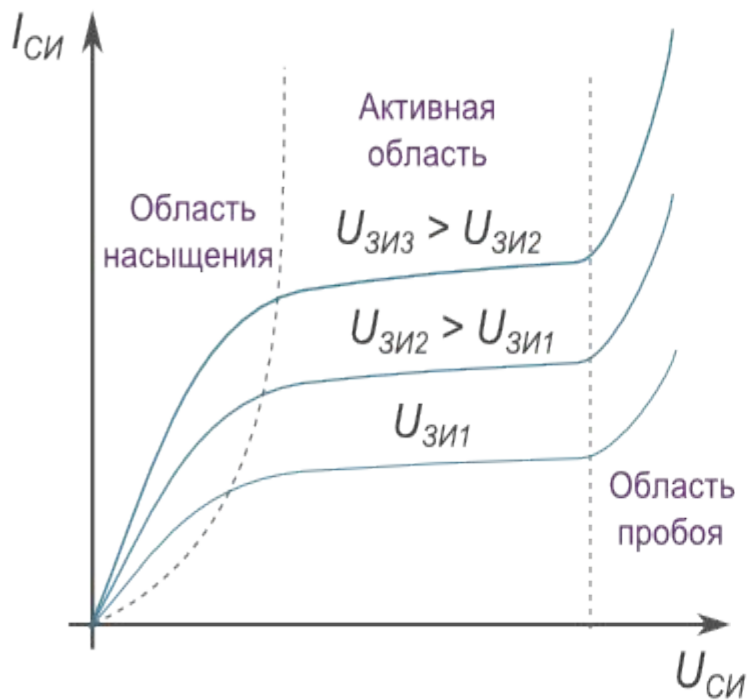


График а)

Стоковые (выходные) характеристики
МДП-транзистора с индуцированным
каналом

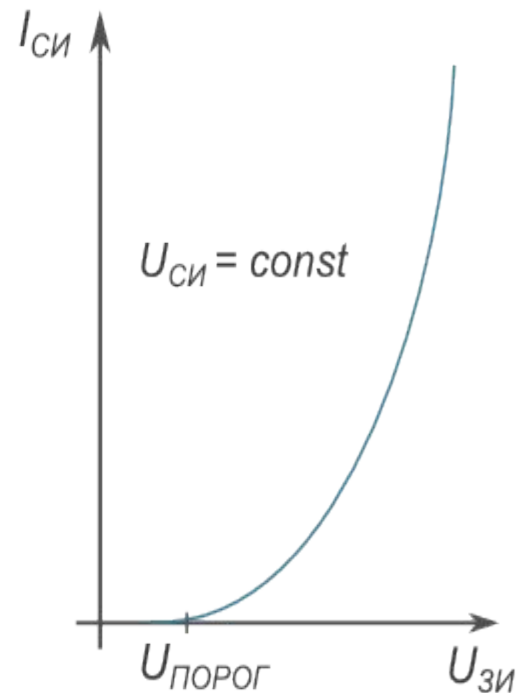
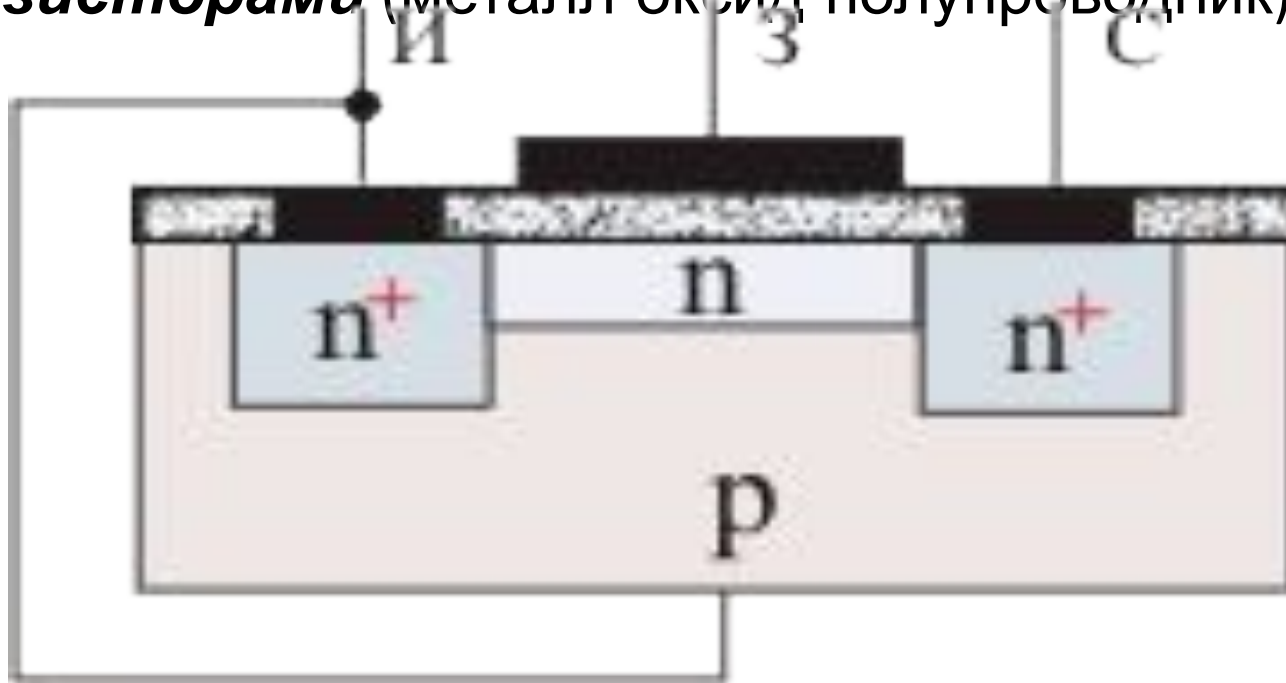


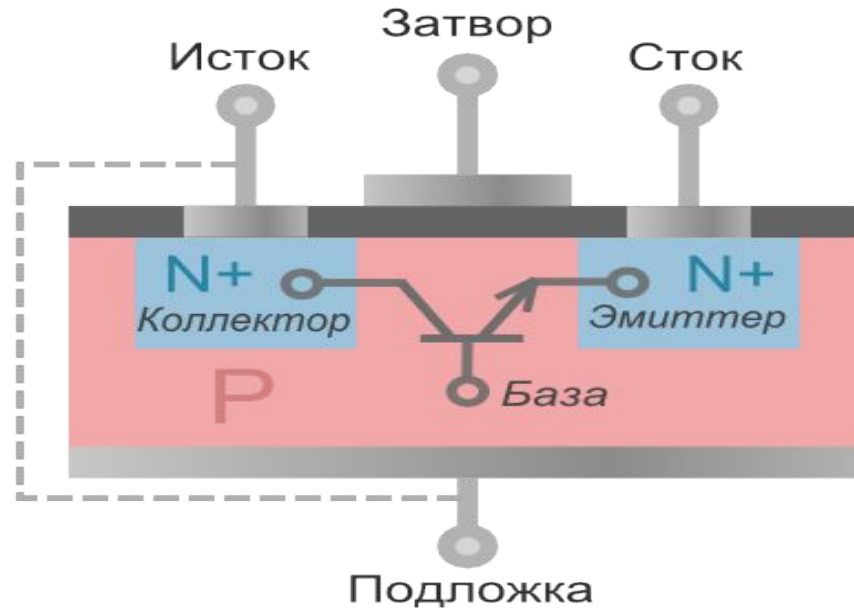
График б)

Стоко-затворная характеристика
МДП-транзистора с индуцированным
каналом

Помимо полевых транзисторов с управляющим переходом существуют так называемые **транзисторы с изолированным затвором**. По-другому такие транзисторы называют **МДП-транзисторами** (металл-диэлектрик-полупроводник) или **МОП-транзисторами** (металл-оксид-полупроводник).



Принцип устройства МДП-транзистора с собственным каналом n-типа



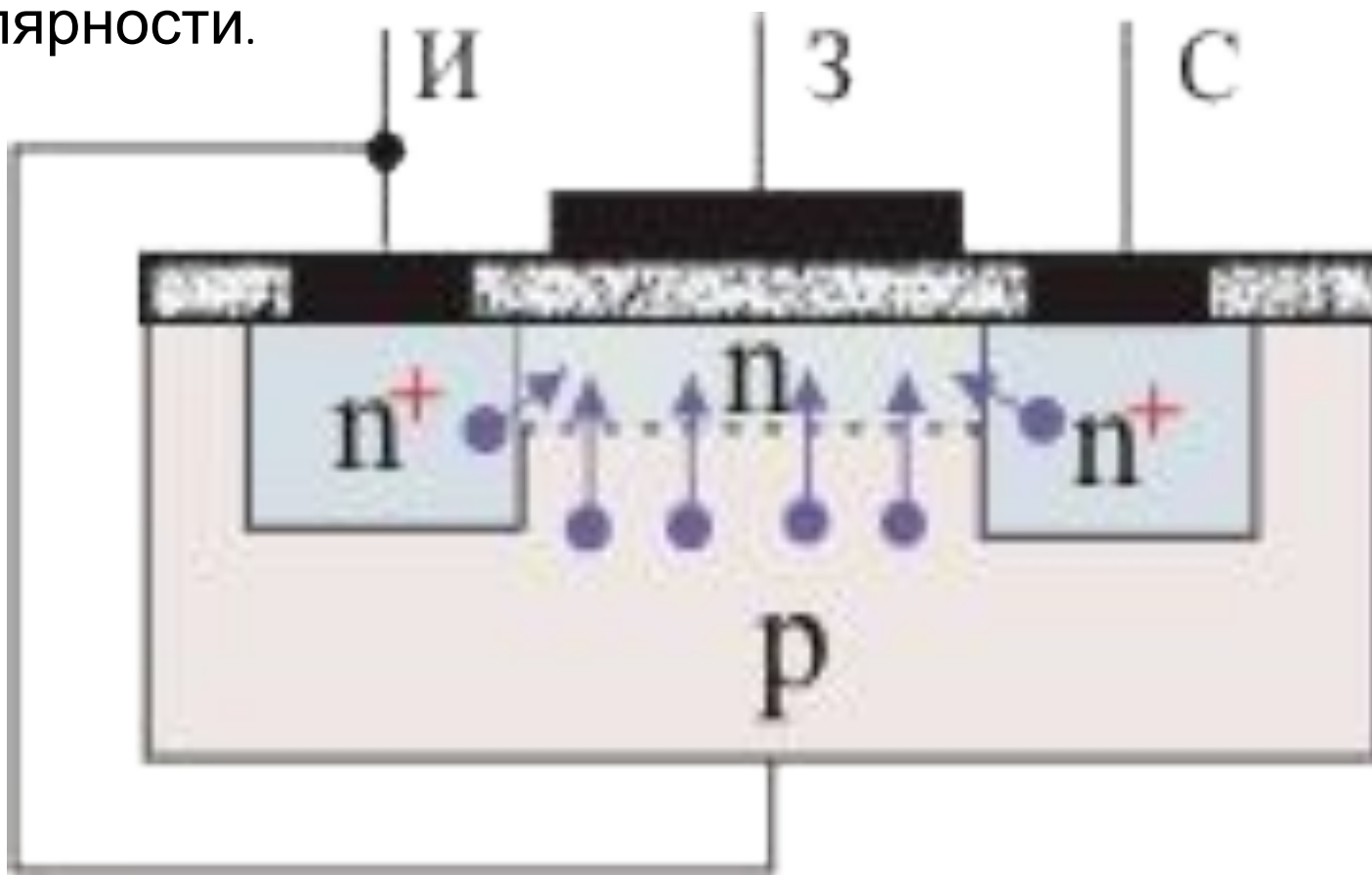
Паразитный биполярный NPN-транзистор внутри МДП-транзистора

При изготовлении мощных МОП-транзисторов, в их структуре возникает «паразитный» биполярный транзистор. Для того, чтобы нейтрализовать его влияние, подложку закорачивают с истоком. Это эквивалентно закорачиванию базы и эмиттера паразитного транзистора. В результате напряжение между базой и эмиттером биполярного транзистора никогда не достигнет необходимого, чтобы он открылся (около 0.6В необходимо, чтобы PN-переход внутри прибора начал проводить).

Основанием служит кремниевая пластинка с электропроводностью р-типа. В ней созданы две области с электропроводностью n^+ -типа с повышенной проводимостью. Эти области являются истоком и стоком и от них сделаны выводы. Между стоком и истоком имеется приповерхностный канал с электропроводностью n-типа. Заштрихованная область - диэлектрический слой из диоксида кремния (его толщина обычно составляет 0,1 - 0,2 мкм). Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической пленки. Кристалл такого транзистора обычно соединен с истоком и его потенциал принимается за нулевой. Иногда от кристалла бывает сделан отдельный вывод. Рассмотренный транзистор называют **транзистором с собственным (встроенным) каналом**. Посмотрим, как же он работает.

Если на затвор приложено нулевое напряжение, то, подав между стоком и истоком напряжение, через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдет, так как один из р-n-переходов находится под обратным напряжением. При подаче на затвор напряжения отрицательной полярности относительно истока (следовательно, и кристалла) в канале образуется поперечное электрическое поле, которое выталкивает электроны из канала в области истока и стока и кристалла. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается, ток уменьшается. Чем больше напряжение на затворе, тем меньше ток. Такой режим называется **режимом обеднения**. Если подать положительное напряжение на затвор, то под действием поля из областей стока, истока и кристалла в канал будут приходить электроны. Сопротивление канала падает, ток увеличивается. Такой режим называется **режимом обогащения**. Если кристалл n-типа, то канал должен быть

Другим типом является так называемый **транзистор с индуцированным (инверсным) каналом** (рис. 3). От предыдущего он отличается тем, что канал возникает только при подаче на затвор напряжения определенной полярности.



Принцип устройства транзистора с индуцированным каналом n-типа

При отсутствии напряжения на затворе канала нет, между истоком и стоком n^+ -типа расположен только кристалл p -типа и на одном из p - n^+ -переходов получается обратное напряжение. В этом состоянии сопротивление между стоком и истоком велико и транзистор закрыт. При подаче на затвор напряжения положительной полярности под влиянием поля затвора электроны проводимости будут перемещаться из областей стока и истока и p -области по направлению к затвору. Когда напряжение на затворе достигает своего отпирающего (порогового) значения (единицы вольт), в приповерхностном слое концентрация электронов настолько увеличивается, что превышает концентрацию дырок, и в этом слое произойдет так называемая **инверсия** типа электропроводности, т. е. образуется тонкий канал n -типа и транзистор начнет проводить ток. Чем больше напряжение на затворе, тем больше ток стока. Очевидно, что такой транзистор может работать только в режиме обогащения. Если подложка n -типа, то получится индуцированный канал p -типа. Транзисторы с индуцированным каналом часто встречаются в устройствах переключения (очень часто в звукотехнике).

Схемы включения полевых транзисторов подобны схемам включения биполярных. Следует отметить, что полевой транзистор позволяет получить намного больший коэффициент усиления, нежели биполярный. Обладая высоким входным сопротивлением (и низким выходным) полевые транзисторы постепенно вытесняют биполярные. Следует также помнить, что полевые транзисторы очень "боятся" статического электричества, поэтому при работе с ними предъявляют особо жесткие требования по защите от статического электричества.

Преимущества и недостатки полевого транзистора JFET

Высокое входное сопротивление

Одно из важнейших свойств полевых транзисторов, как уже упоминалось выше, это очень высокое входное сопротивление $R_{вх}$ (R_{in}). Причем у полевых транзисторов с изолированным затвором MOSFET, R_{in} в среднем еще на несколько порядков выше, чем у JFET. Благодаря этому, полевые транзисторы практически не потребляют ток у источников сигнала, который надо усилить.

Например, цифровая схема микроконтроллера генерирует сигнал, управляющий работой электродвигателя. Такого рода схема обычно располагает очень малым током на выходе, что явно недостаточно для двигателя. Здесь потребуется усилитель, потребляющий крайне мало тока на входе, и выдающий на выходе сигнал такой же формы и частоты как на выходе у микроконтроллера, только уже с большим выходным током. Здесь как раз и подойдет усилитель, основанный на JFET транзисторе с высоким входным сопротивлением.

Низкий коэффициент усиления по напряжению

Значительным недостатком JFET по сравнению с биполярным транзистором является очень низкий коэффициент усиления по напряжению. Если построить усилитель на основе одного прибора JFET, можно добиться V_{out}/V_{in} в лучшем случае около 20. При аналогичном использовании биполярного транзистора с высокой β (коэффициент усиления биполярного транзистора – ток коллектора/ток базы) можно достигнуть V_{out}/V_{in} в несколько сотен.