

Лекция 23. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

План

1. Классификация полевых транзисторов.
2. Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом.
3. МОП-транзисторы с индуцированным каналом.
4. МОП-транзисторы с встроенным каналом.
5. Выводы.

1. Классификация полевых транзисторов

Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока осуществляется изменением проводимости проводящего канала с помощью поперечного электрического поля. В отличие от биполярного ток полевого транзистора обусловлен потоком основных носителей.

Электроды полевого транзистора называют *истоком* (И), *стоком* (С) и *затвором* (З). Управляющее напряжение прикладывается между затвором и истоком. От напряжения между затвором и истоком зависит проводимость канала, следовательно, и величина тока. Таким образом, полевой транзистор можно рассматривать как источник тока, управляемый напряжением затвор-исток. Если амплитуда изменения управляющего сигнала достаточно велика, сопротивление канала может изменяться в очень больших пределах. В этом случае полевой транзистор можно использовать в качестве электронного ключа.

По конструкции полевые транзисторы можно разбить на две группы: с управляющим $p-n$ -переходом;

с металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком.

Транзисторы второго вида называют МДП-транзисторами (металл – диэлектрик – полупроводник). В большинстве случаев диэлектриком является двуокись кремния SiO_2 , поэтому обычно используется название МОП-транзисторы (металл – окисел – полупроводник). В современных МОП-транзисторах для изготовления затвора часто используется поликристаллический кремний. Однако название МОП-транзистор используют и для таких приборов.

Проводимость канала полевого транзистора может быть электронной или дырочной. Если канал имеет электронную проводимость, то транзистор называют n -канальным. Транзисторы с каналами, имеющими дырочную проводимость, называют p -канальными. В МОП- транзисторах канал может быть обеднён носителями или обогащён ими. Таким образом, понятие «полевой транзистор» объединяет шесть различных видов полупроводниковых приборов.

МОП-транзисторы находят широкое применение в современной электронике. В ряде областей, в том числе в цифровой электронике, они почти полностью вытеснили биполярные транзисторы. Это объясняется следующими при-

чинами. Во-первых, полевые транзисторы имеют высокое входное сопротивление и обеспечивают малое потребление энергии. Во-вторых, МОП-транзисторы занимают на кристалле интегральной схемы значительно меньшую площадь, чем биполярные. Поэтому плотность компоновки элементов в МОП-интегральных схемах значительно выше. В-третьих, технологии производства интегральных схем на МОП-транзисторах требуют меньшего числа операций, чем технологии изготовления ИС на биполярных транзисторах.

2. Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом

Структура полевого транзистора с каналом n -типа показана на рис. 23.1, а. На рис. 23.1, б приведено его условное графическое обозначение.

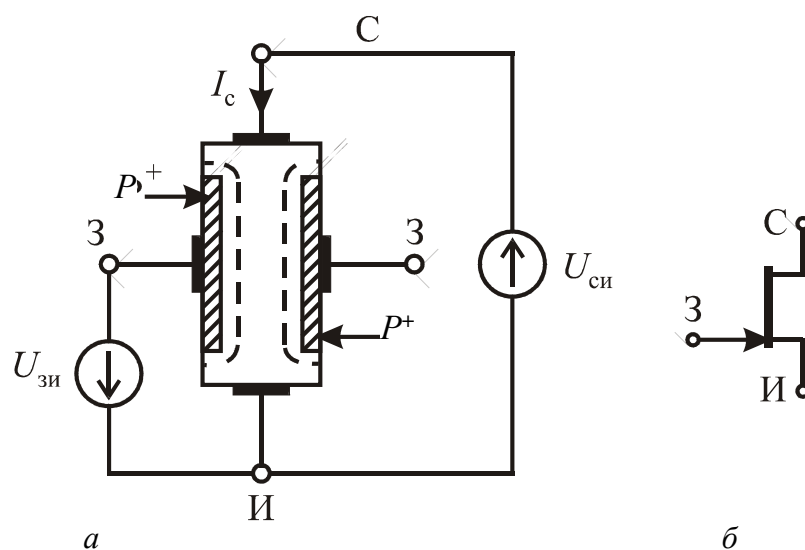


Рис. 23.1

Канал между стоком и истоком формируется из слабо обогащённого полупроводника n -типа. Две области затвора содержат сильно обогащённый полупроводник p -типа. Принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом основан на изменении проводимости канала за счёт изменения его поперечного сечения. Между стоком и истоком включается напряжение такой полярности, чтобы основные носители заряда (электроны в канале n -типа) перемещались от истока к стоку. Между затвором и истоком включено отрицательное управляющее напряжение, которое запирает $p-n$ -переход. Чем больше это напряжение, тем шире запирающий слой и уже канал. С уменьшением поперечного сечения канала его сопротивление увеличивается, а ток в цепи сток – исток уменьшается. Это позволяет управлять током стока с помощью напряжения затвор-исток $U_{зи}$. При некоторой величине напряжения затвор-исток запирающий слой полностью перекрывает канал, что приводит к уменьшению проводимости канала. Напряжение $U_{зи}$, при котором перекрывается канал, назы-

вают напряжением отсечки и обозначают $U_{отс}$. Для n -канального полевого транзистора напряжение отсечки отрицательно.

Рассмотрим вольт-амперные характеристики ПТ. Входные характеристики у полевых транзисторов отсутствуют, так как входной ток равен нулю. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа показаны на рис. 23.2. На выходной характеристике можно выделить три области – отсечки, линейную (триодную) и насыщения. В линейной области ВАХ представляют прямые, наклон которых зависит от напряжения затвор-исток $U_{зи}$. Минимальное сопротивление канала достигается, когда напряжение $U_{зи} = 0$, так как проводящая часть канала в этом случае имеет наибольшее сечение. Таким образом, в линейной области полевой транзистор можно использовать как резистор, сопротивление которого регулируется напряжением затвора.

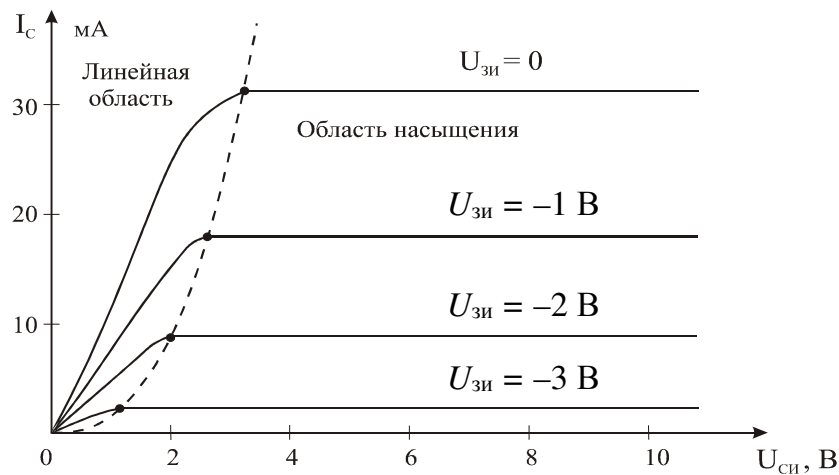


Рис. 23.2

В области насыщения ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально. Это объясняется тем, что при увеличении напряжения сток-исток $U_{си}$ область перекрытия канала вблизи стока расширяется и сопротивление канала увеличивается.

В области насыщения полевой транзистор удобно моделировать передаточной характеристикой – зависимостью тока стока I_c от напряжения затвор-исток $U_{зи}$ при постоянном напряжении сток-исток:

$$I_c = f(U_{зи})|U_{си} = \text{const}.$$

Передаточная характеристика n -канального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом показана на рис. 23.3.

При нулевом напряжении на затворе ток стока имеет максимальное значение, которое называют начальным $I_{снач}$. При увеличении напряжения

затвор-исток ток стока уменьшается и при напряжении отсечки $U_{отс}$ становится близким к нулю.

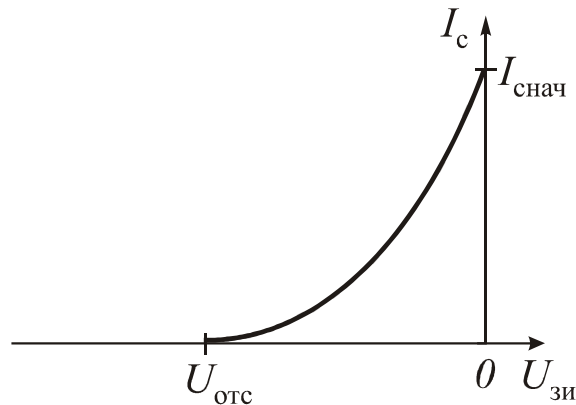


Рис. 23.3

Приведем уравнения, которыми описываются характеристики полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом.

Режим отсечки:

$$U_{зи} \leq U_{отс}, I_c = 0.$$

Линейный режим:

$$U_{отс} \leq U_{зи} \leq 0, U_{си} \leq U_{зи} - U_{отс}.$$

ВАХ полевого транзистора на участке, соответствующем линейному режиму, аппроксимируется выражением

$$I_c = I_{снач} \left[2 \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right) \left(\frac{U_{си}}{-U_{отс}} \right) - \left(\frac{U_{си}}{U_{отс}} \right)^2 \right].$$

Режим насыщения:

$$U_{отс} \leq U_{зи} \leq 0, U_{си} \geq U_{зи} - U_{отс},$$

$$I_c = I_{снач} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right)^2.$$

Поведение p -канальных полевых транзисторов описывается такими же уравнениями. Следует учесть только, что для p -канальных ПТ напряжения имеют другую полярность, т. е. $U_{отс} > 0$, а $U_{си} < 0$.

Важным параметром полевого транзистора является *крутизна характеристики*, определяемая как отношение приращения тока стока ΔI_c к приращению напряжения затвор-исток $\Delta U_{зи}$:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{dI_c}{dU_{зи}}.$$

Крутизна полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом может изменяться от 1–2 мА/В у маломощных приборов до единиц А/В у силовых транзисторов. Максимальное значение крутизна имеет при $U_{зи} = 0$. С увеличением напряжения на затворе крутизна уменьшается и при $U_{зи} = U_{отс}$ становится равной нулю.

3. МОП-транзисторы с индуцированным каналом

Другим типом транзистора с изолированным затвором является *МОП-транзистор с индуцированным каналом*. Структура транзистора с индуцированным каналом n -типа показана на рис. 23.4, а. На рис. 23.4, б приведено его условное графическое обозначение. От МОП-транзистора с встроенным каналом он отличается тем, что канал возникает только при подаче на затвор напряжения определенной полярности. При нулевом напряжении канал отсутствует. При этом между стоком и истоком включены два обратно смещенных p - n -перехода. Один p - n -переход образуется на границе между подложкой и стоком, а другой – между подложкой и истоком. Таким образом, при нулевом напряжении на затворе сопротивление между стоком и истоком очень велико, ток стока ничтожно мал и транзистор находится в состоянии отсечки.

Если между затвором и истоком включен источник напряжения (рис. 23.5), то электрическое поле затвора выталкивает дырки из приповерхностного слоя подложки и притягивает в этот слой электроны. В результате в области подложки, примыкающей к диэлектрику, образуется проводящий канал n -типа. Такой канал называют *индуцированным*. С увеличением положительного напряжения затвор-исток $U_{зи}$ растет концентрация электронов в канале, следовательно, увеличивается его проводимость.

Если между стоком и истоком приложено положительное напряжение, в индуцированном канале возникает ток стока. Его величина зависит как от напряжения $U_{зи}$, так и от напряжения сток-исток $U_{си}$. Напряжение затвора, при котором появляется заметный ток стока, называют *пороговым* и обозна-

чают U_0 . Пороговое напряжение МОП-транзистора с индуцированным каналом n -типа положительно. Его величина зависит от технологии изготовления и составляет для современных интегральных МОП-транзисторов 0.5–1.0 В.

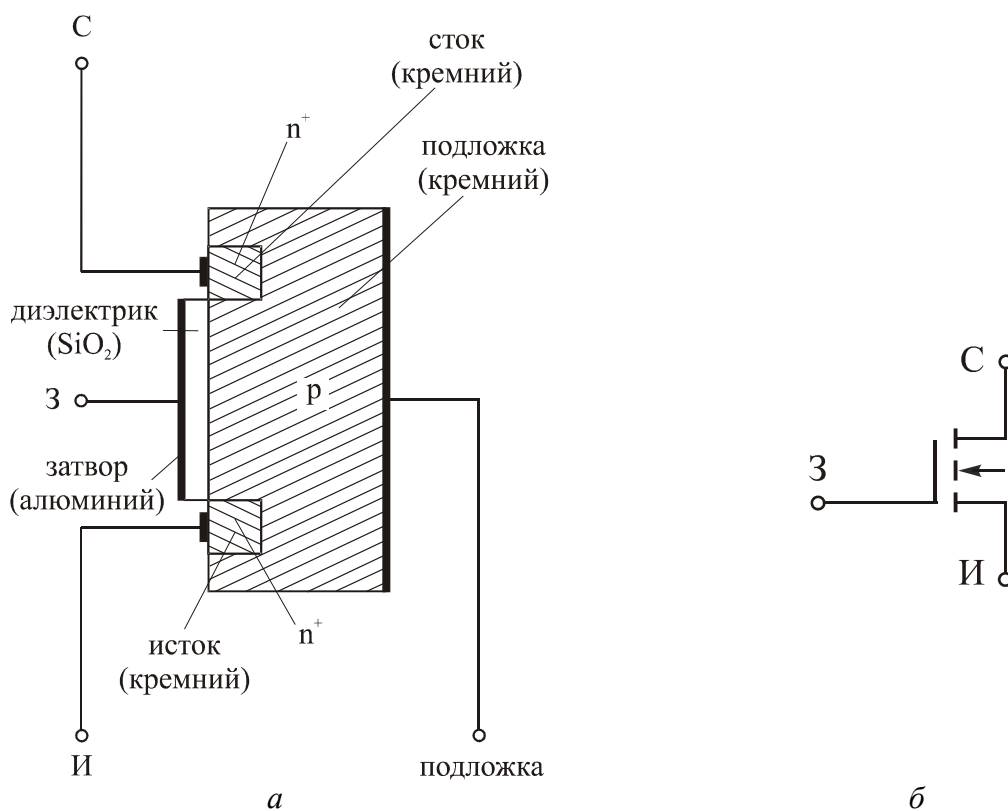


Рис. 23.4

Чем больше напряжение затвор-исток превышает пороговое, тем большее количество электронов втягивается в канал, увеличивая его проводимость. Если при этом напряжение сток-исток невелико, проводимость канала пропорциональна разности $U_{зи} - U_0$.

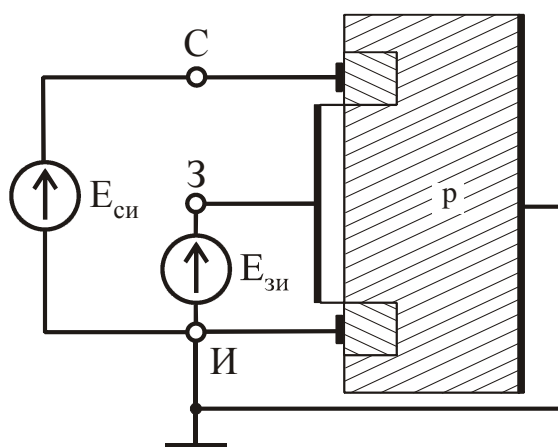


Рис. 23.5

Если напряжение сток-исток превышает *напряжение насыщения* $U_{\text{нас}} = U_{\text{зи}} - U_0$, транзистор переходит в режим насыщения и рост тока прекращается. Объясняется это тем, что напряжение между затвором и поверхностью канала уменьшается в направлении стока. Вблизи истока оно равно $U_{\text{зи}}$, а в окрестности стока – разности $U_{\text{зи}} - U_{\text{си}}$. Поэтому при увеличении напряжения $U_{\text{си}}$ сечение канала уменьшается по направлению к стоку, а его сопротивление увеличивается. При значениях $U_{\text{си}}$, превышающих напряжение насыщения, канал перекрывается и ток стока остается практически неизменным. Очевидно, что каждому значению $U_{\text{зи}} > U_0$ соответствует свое значение напряжения насыщения.

Семейство выходных характеристик транзистора с индуцированным каналом показано на рис. 23.6. На выходных характеристиках можно выделить линейную (триодную) область, области насыщения и отсечки. Граница между линейной областью и областью насыщения показана на рис. 23.6 пунктиром.

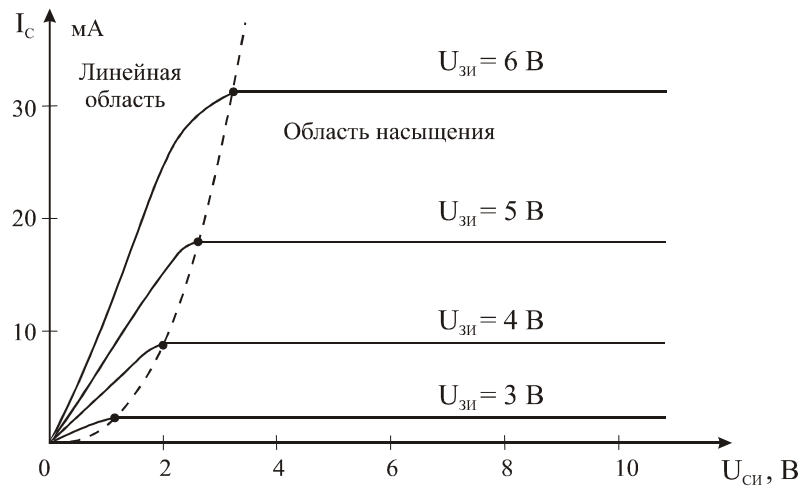


Рис. 23.6

В режиме отсечки $U_{\text{зи}} < U_0$, $I_c = 0$. Область отсечки расположена ниже ветви выходной характеристики, соответствующей напряжению $U_{\text{зи}} = U_0$.

В линейном (триодном) режиме $U_{\text{зи}} > U_0$, а напряжение сток-исток не превышает напряжение насыщения

$$U_{\text{си}} \leq U_{\text{нас}} = U_{\text{зи}} - U_0.$$

Выходная характеристика на участке, соответствующем линейному режиму, аппроксимируется выражением

$$I_c = b[(U_{\text{зи}} - U_0)U_{\text{си}} - 0.5U_{\text{си}}^2]. \quad (23.1)$$

Здесь b – удельная крутизна МОП-транзистора:

$$b = \mu C_0 \frac{W}{L}. \quad (23.2)$$

В (23.2) μ – приповерхностная подвижность носителей, C_0 – удельная емкость затвор-канал, L – длина, W – ширина канала.

Если напряжение сток-исток мало, как часто бывает в импульсных и ключевых схемах, квадратичным слагаемым в (23.1) можно пренебречь. В этом случае мы получаем линейную зависимость:

$$I_c = b(U_{зи} - U_0)U_{си}.$$

Величину $b(U_{зи} - U_0)$ называют *проводимостью канала*, а обратную величину – *сопротивлением канала*:

$$R_{cu} = \frac{1}{b(U_{зи} - U_0)}.$$

Таким образом, при малых напряжениях сток-исток МОП-транзистор эквивалентен линейному резистору, сопротивление которого регулируется напряжением затвора. Сопротивление эквивалентного резистора может изменяться от десятков Ом до десятков МОм. Если $U_{зи} < U_0$, сопротивление бесконечно. С увеличением $U_{зи}$ сопротивление уменьшается.

Режим насыщения МОП-транзистора с индуцированным каналом возникает, когда $U_{зи} > U_0$, а напряжение сток-исток превышает напряжение насыщения

$$U_{си} \geq U_{нас} = U_{зи} - U_0.$$

В области насыщения ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально, т. е. ток стока практически не зависит от напряжения $U_{си}$. Таким образом, в режиме насыщения канал МОП-транзистора имеет высокое сопротивление, а транзистор эквивалентен источнику тока, управляемому напряжением затвор-исток.

Область насыщения является рабочей, если транзистор используется для усиления сигналов. Области отсечки и линейная используются, когда транзистор работает в режиме ключа.

Передаточная характеристика МОП-транзистора с индуцированным каналом показана на рис. 23.7. При нулевом напряжении на затворе ток стока равен нулю. Заметный ток появляется тогда, когда напряжение затвора превысит пороговое значение U_0 .

Передаточная характеристика МОП-транзистора для области насыщения аппроксимируется выражением

$$I_c = \frac{1}{2} b (U_{зи} - U_0)^2. \quad (23.3)$$

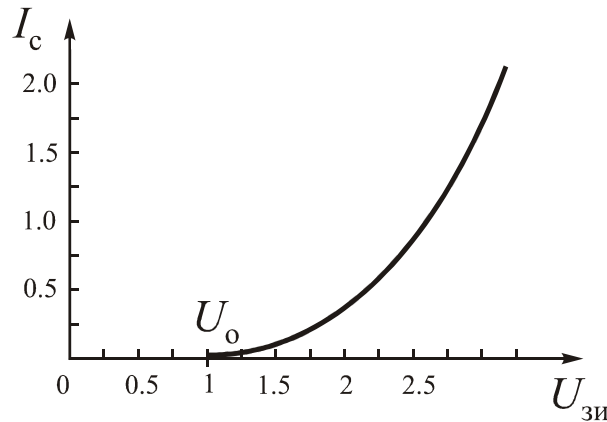


Рис. 23.7

Удельная крутизна характеристики МОП-транзистора определяется выражением 23.2.

Номинальным током МОП-транзистора считается ток при напряжении $U_{зи} = 2U_0$:

$$I_{c \text{ ном}} = \frac{1}{2} b U_0^2.$$

Геометрические размеры канала являются важными параметрами МОП-транзистора, определяющими его электрические характеристики. Варьируя величины L и W , разработчики интегральных схем получают транзисторы с нужными характеристиками. От размеров канала зависит площадь, которую занимает транзистор на кристалле интегральной схемы. Длина канала современных интегральных МОП-транзисторов составляет 0.06–1 мкм, а ширина – 0.2–100 мкм. Толщина диэлектрика, изолирующего затвор от канала, равна 0.002–0.05 мкм.

МОП-транзисторы с индуцированным каналом являются доминирующими элементами современных сверхбольших интегральных схем (СБИС). Технологии изготовления СБИС принято характеризовать минимальной длиной канала L_{\min} . Стандартными в настоящее время являются технологии, обеспечивающие L_{\min} 0.18 и 0.13 мкм. Впечатляющей является динамика снижения минимальной длины канала МОП-транзисторов: 1.5 мкм – в 1985 году (процессор Intel 286), 1.0 мкм в 1989 (Intel 386), 0.8 мкм – в 1991 (Intel 486), 0.25 мкм – в 1998 (Pentium II), 0.18 мкм – в 1999 (Pentium III), 0.13 мкм – в 2002, 0.065 мкм – в 2006 г. Длину канала МОП-транзисторов становится удобно измерять не в

микронах, а в нанометрах (нм). По прогнозам специалистов к 2010 году L_{\min} достигнет величины 32 нм.

Уменьшение геометрических размеров МОП-транзисторов сопровождается снижением рабочих напряжений. Это вызвано следующими причинами. Во-первых, при уменьшении размеров канала уменьшается и толщина диэлектрика, изолирующего затвор от канала. Для исключения вероятности пробоя величину порогового напряжения U_0 снижают. Во-вторых, мощность, потребляемая транзистором, пропорциональна квадрату питающего напряжения. Поэтому величина напряжения питания современных СБИС уменьшается быстрее, чем пороговые напряжения.

В современной интегральной схемотехнике широко используют полевые транзисторы с каналами обоих типов проводимости. У p -канального МОП-транзистора подложка имеет электронную проводимость, а области стока и истока – дырочную. У таких транзисторов пороговое и рабочие напряжения имеют обратную полярность по сравнению с n -канальным:

$$U_0 < 0, U_{зи} < 0, U_{си} < 0.$$

Электронные схемы, в которых используется сочетание МОП-транзисторов с каналами n - и p -типов, называют *комплементарными* (КМОП). Хотя технология изготовления КМОП-структур сложнее, чем цепей, содержащих только n -канальные транзисторы, наличие транзисторов с каналами разных типов предоставляет разработчикам интегральных схем дополнительные возможности. В настоящее время комплементарные структуры стали преобладающими как в цифровых, так и аналоговых интегральных схемах.

4. МОП-транзисторы с встроенным каналом

Структура МОП-транзистора с встроенным каналом n -типа показана на рис. 23.8, *а*. На рис. 23.8, *б* приведено его условное графическое обозначение. Подложка (кристалл кремния p -типа) служит для создания на ней канала n -типа. У МОП-транзисторов имеется дополнительный вывод от подложки. Металлический затвор отделен от полупроводника слоем диэлектрика. Области стока и истока легированы сильнее, чем канал, и обозначены n^+ .

В качестве диэлектрика используется слой двуокиси кремния толщиной 0.002–0.05 мкм, выращиваемый на поверхности кремния n -типа.

При подаче отрицательного напряжения на затвор металлический электрод затвора заряжается отрицательно. У прилегающей к диэлектрику поверхности канала образуется обедненный слой. Ширина обедненного слоя зависит от напряжения $U_{зи}$. Такой режим работы МОП-транзистора, когда концентрация носителей в канале меньше равновесной, называют *режимом обеднения*. При некоторой величине отрицательного напряжения $U_{зи}$ канал

полностью перекрывается обедненным слоем и ток прекращается. Это напряжение называют *напряжением отсечки* МОП-транзистора с встроенным каналом и обозначают $U_{отс}$.

Ток МОП-транзистора с встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе имеет ненулевое значение, называемое *начальным* $I_{снач}$. Если $U_{зи} > 0$, число электронов в канале увеличивается. Это приводит к увеличению проводимости канала. Такой режим работы транзистора с встроенным каналом, при котором концентрация носителей в канале больше равновесной, называют *режимом обогащения*.

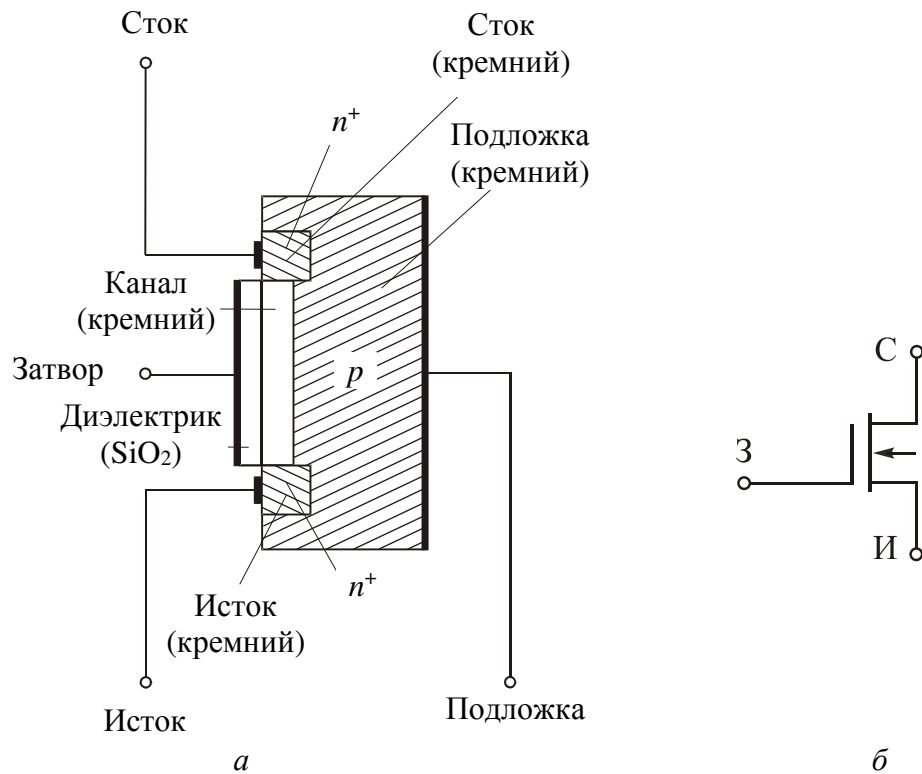


Рис. 23.8

Таким образом, МОП-транзистор с встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, при положительном напряжении $U_{зи}$. Выходные характеристики МОП-транзистора с встроенным каналом n -типа показаны на рис. 23.9.

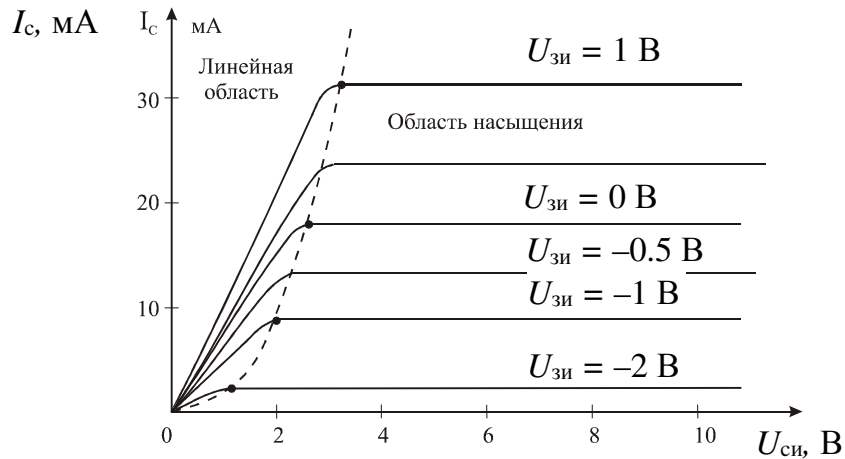


Рис. 23.9

Передаточная характеристика МОП-транзистора с встроенным каналом показана на рис. 23.10.

Начальное значение тока стока МОП-транзистора с встроенным каналом определяется выражением

$$I_{c \text{ нач}} = \mu C_0 \frac{W}{L} U_0^2.$$

Здесь μ – приповерхностная подвижность носителей, C_0 – удельная емкость затвор-канал. Длина канала L равна расстоянию между областями стока и истока, а ширина W – протяженности этих областей.

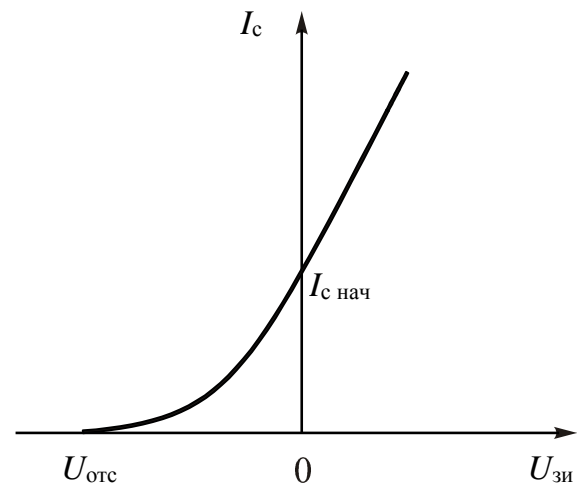


Рис. 23.10

5. Выводы

1. Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока осуществляется изменением сопротивления проводящего канала с помощью поперечного электрического поля. Ток полевого транзистора обусловлен потоком основных носителей.

2. Электроды полевого транзистора называют истоком (И), стоком (С) и затвором (З). Управляющее напряжение прикладывается между затвором и истоком. Полевой транзистор можно рассматривать как источник тока, управляемый напряжением затвор-исток.

3. По конструкции полевые транзисторы можно разбить на две группы:
 - с управляющим p - n -переходом;
 - с металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком (МОП-транзисторы).

4. МОП-транзисторы находят широкое применение в современной электронике. В ряде областей, в том числе в цифровой электронике, они почти полностью вытеснили биполярные транзисторы.