

УНИПОЛЯРНЫЕ (ПОЛЕВЫЕ) ТРАНЗИСТОРЫ

Униполярными называются транзисторы, в которых для создания тока используются носители заряда только одного знака.

Эти транзисторы делятся на два основных класса:

- 1) Транзисторы с pn-переходом
- 2) МДП – (или МОП-) транзисторы.

Транзисторы с pn-переходом

Транзистор состоит из области n-типа, к которой примыкают две *одинаковые* области р-типа (рис. 1). Оба р-слоя электрически связаны между собой и имеют общий внешний электрод, называемый *затвором* (З).

Принцип действия состоит в том, что подключением двух источников напряжения осуществляется воздействие на проводимость канала n-типа. «Поперечное» напряжение $U_{зи}$, подключенное между *истоком* (И) и *затвором* (З), предназначено для изменения проводимости канала равномерно по всей ширине. «Продольное» напряжение $U_{си}$ создает разность потенциалов для направленного движения основных носителей канала (в рассматриваемом случае это электроны) от *истока* (И) к *стоку* (С). В транзисторах данного типа носители заряда (в данном случае электроны) начинают движение от электрода, называемого *истоком*.

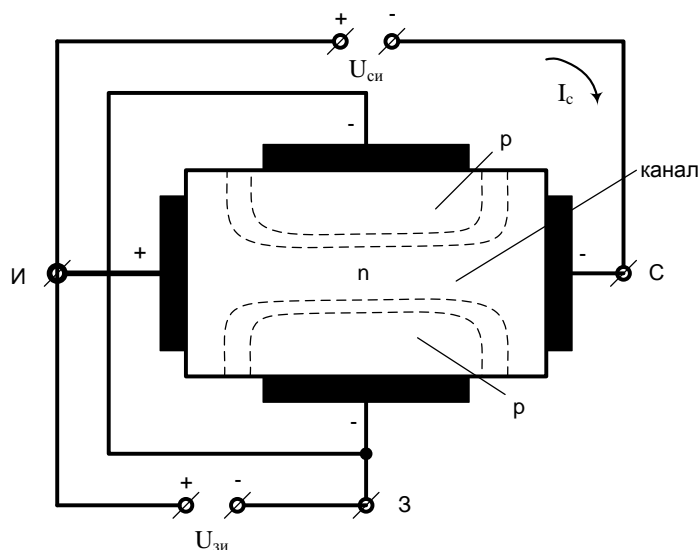


Рисунок 1. Структура и подключение напряжений к транзистору с каналом n-типа

Для транзистора с каналом р-типа полярность напряжений будет противоположной. Основными носителями будут являться дырки. Условное графическое обозначение (УГО) транзисторов приведено на рис. 2.

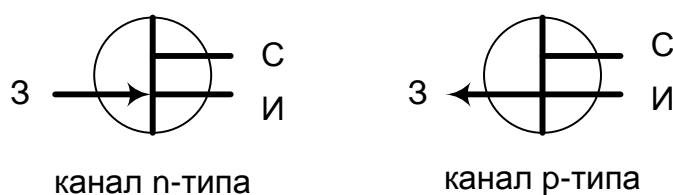


Рисунок 2. УГО транзисторов

Полярность направлений показана на рисунке. Видно, что общей точкой является И. На затвор относительно И подается отрицательное напряжение, поэтому оба рп-перехода смещены в обратном направлении. Чтобы создать направленное движение зарядов от И к С, к С приложено отрицательное относительно стока напряжение.

Концентрация носителей заряда в р-слоях делается значительно выше концентрации зарядов в n-канале. Поэтому основная часть ширины рп-переходов располагается в канале. При изменении напряжения $U_{зи}$ (оно смещает оба перехода в обратном направлении) вследствие эффекта модуляции ширины высокоомного n-слоя (аналогично эффекту модуляции ширины базы в биполярном транзисторе) изменяется ширина проводящего канала. Тем самым изменяется сечение токопроводящего канала и его проводимость, т.е. ток I_c прибора.

Таким образом действие прибора основано на изменении проводимости канала под действием поля. Отсюда – другое название униполярного транзистора – *полевой*.

Влияние напряжений на проводимость канала и величину тока

1. Влияние $U_{зи}$ на I_c

Пусть $U_{си}=0$ (рисунок 3), тогда при повышении $U_{зи}$ ширина канала уменьшится по всей длине от И до С. Но т.к. $U_{си}=0$, то нет поля, которое могло бы создать направленное движение электронов от истока (И) к стоку (С).

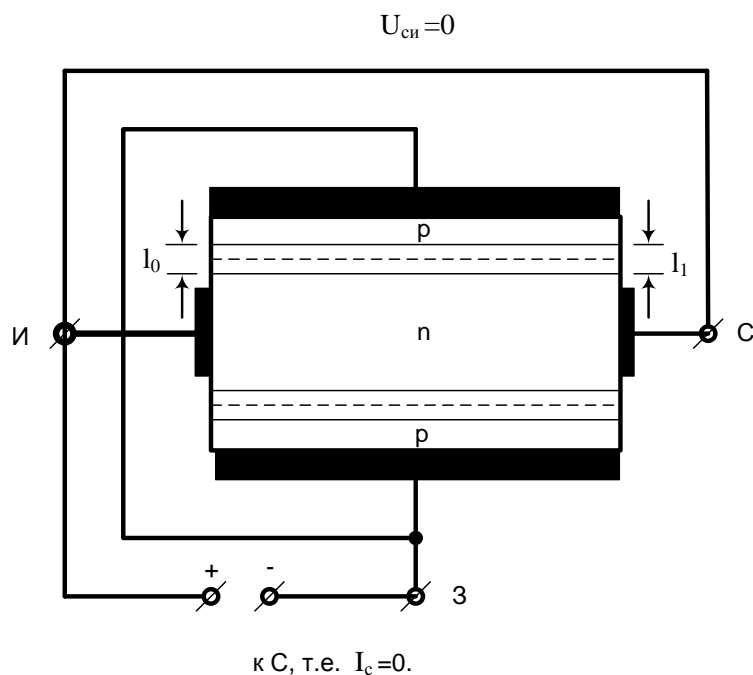


Рисунок 3. Влияние напряжения $U_{зи}$ на проводимость канала

Влияние $U_{сш}$ на I_c

Т.к. $U_{зи} = 0$, а $U_{сш} > 0$ (рисунок 4), к истоку И и обоим выводам затвора З, т.е. к n-слою и р-слоям приложено одинаковое напряжение, поэтому переходы не смещены. Если бы и $U_{сш} = 0$ $I = I_0$ по всей длине канала от истока И к стоку С. Но к стоку приложен положительный относительно истока и относительно затвор (поскольку З и И соединены накоротко). Поэтому вблизи стока получаем смещение рп-переходов в обратном направлении. Ширина n-канала увеличивается по мере приближения к И, т.к. уменьшается разность потенциалов по мере приближения к истоку И. Из рисунка видно, что при некотором значении $U_{сш}$ ширина проводящего канала будет равна 0, т.е. все напряжение $U_{сш}$ будет падать между И и С, ток при этом $I_c = 0$, т.к. канал фактически закрыт.

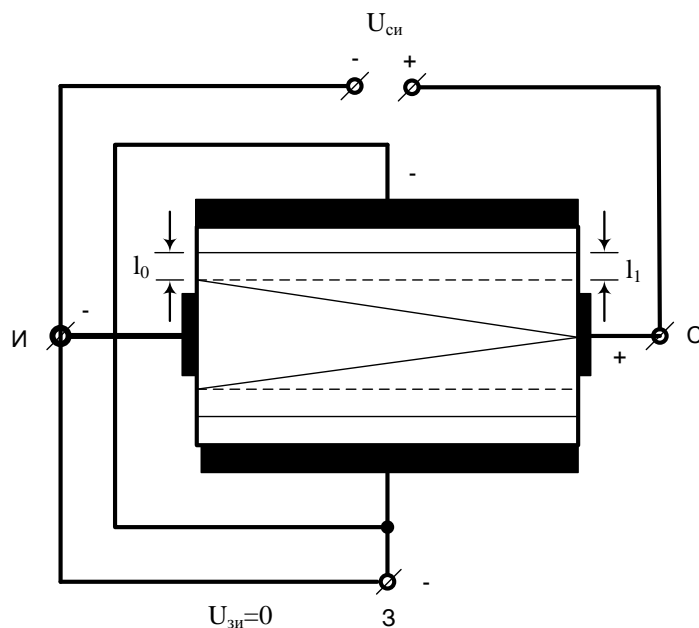


Рисунок 4. Влияние напряжения $U_{зи}$ на проводимость канала

Влияние обоих напряжений

Если повышается $U_{зи}$, сужается ширина канала по всей ширине; если повышается $U_{си}$ ширина канала сужается в сторону стока С (рисунок 5).

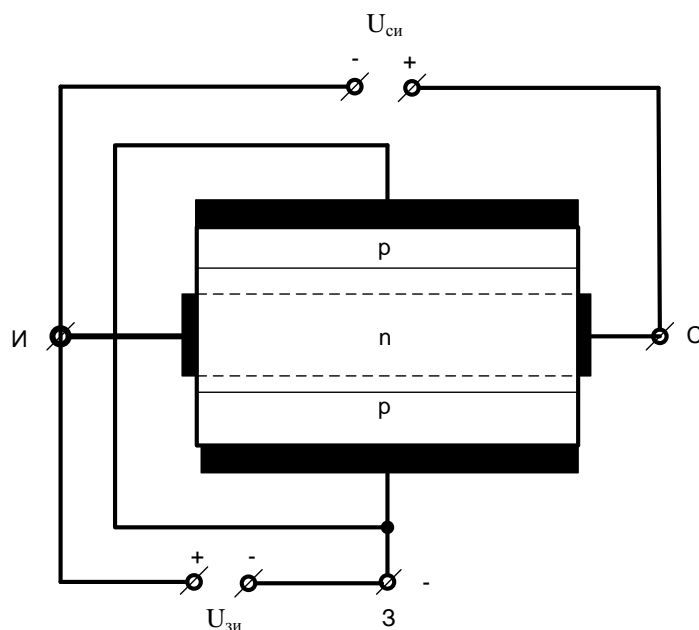


Рисунок 3. Влияние напряжений $U_{зи}$ и $U_{си}$ на проводимость канала

Выходные (стоковые) характеристики

- это зависимости $I_c=f(U_{си})$ при $U_{зи}=const$ (рисунок 6).

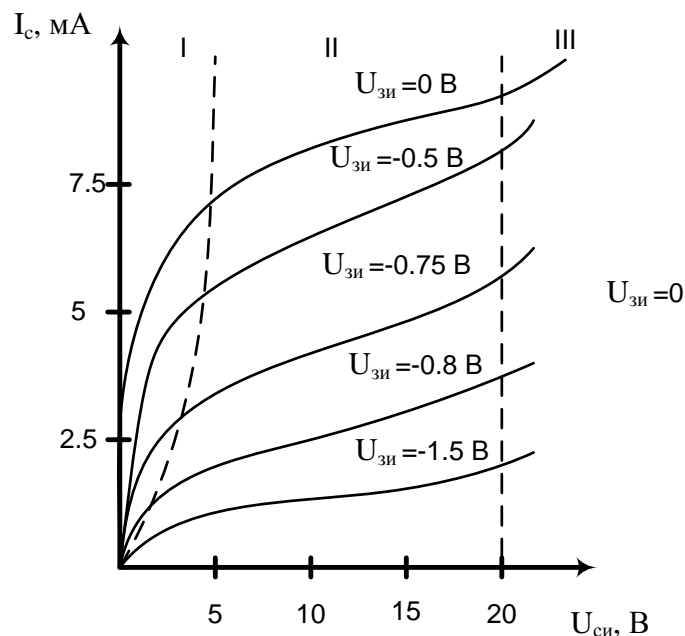


Рисунок 6. Стоковые (выходные) характеристики

Эти характеристики имеют 3 участка, т.к. увеличение U_{cn} оказывает двойное влияние на величину I_c : во-первых при U_{cn} растет поле, создающее ток от И до С; во-вторых, как мы уже выяснили, при повышении U_{cn} канал сужается со стороны стока, поэтому его проводимость уменьшается при падении I_c .

На первом участке ВАХ U_{cn} небольшое, первый фактор оказывает большее влияние, чем второй, поэтому зависимость тока I_c от U_{cn} практически линейная.

На втором участке сужение канала усиливается, поэтому рост поля и сужение канала примерно уравнивают друг друга, поэтому I_c практически не растет при увеличении U_{cn} .

На третьем участке наступает лавинный пробой рп-перехода.

При увеличении U_{zn} происходит сужение канала по всей ширине, поэтому характеристики при повышении U_{zn} идут ниже.

Переходная (стоко-затворная) характеристика

-это зависимость I_c от U_{zn} при $U_{cn}=\text{const}$ (рисунок). Ее можно построить по характеристике стоковой, по точкам.

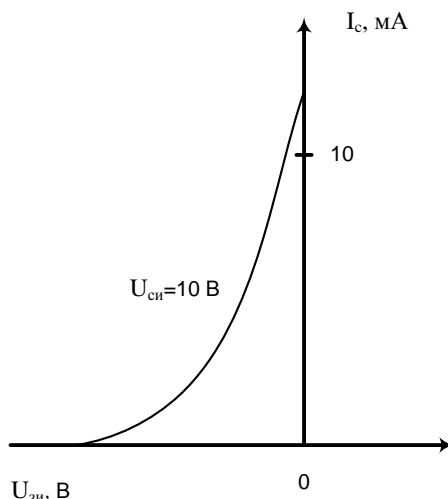


Рисунок 7. Стоко-затворная (входная) характеристика

Основные параметры униполярного транзистора с рп-переходом

- 1) $\max I_c$ - соответствует ш.в. на стоковых характеристиках;
- 2) $\max U_{си}$ - выбирают в 1.2 – 1.5 раз меньше $U_{пробоя}$ переходов при $U_{зи} = 0$.
- 3) направление отсечки $U_{зио}$ - при котором $I_c \approx 0$;
- 4) внутреннее сопротивление $r_i = \frac{dU_{нэ}}{dI_c}$ $U_{зи} = \text{const}$ – определяет наклон стоковой характеристики на участке II.
- 5) крутизна стоко-затворной характеристики $S = \frac{dI_c}{dU_{зэ}} U_{зи} = \text{const}$
- 6) входное сопротивление $r_{вв} = \frac{dU_{зэ}}{dI_c} U_{зи} = \text{const}$ - определяется сопротивлением рп-переходов, смещенных в обратном направлении.

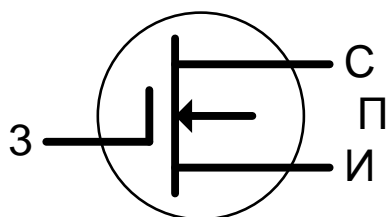
МДП – транзисторы (МОП - транзисторы)

В этих транзисторах затвор изолирован от канала слоем диэлектрика (SiO_2). Поэтому и носит название по структуре металл-диэлектрик-проводник (или металл-диэлектрик-полупроводник).

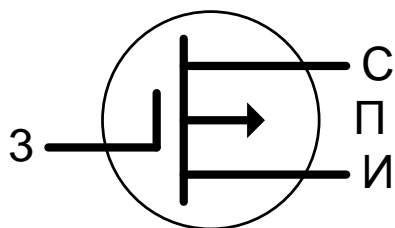
МОП – транзисторы делятся на:

1. МОП-транзисторы со встроенным каналом:

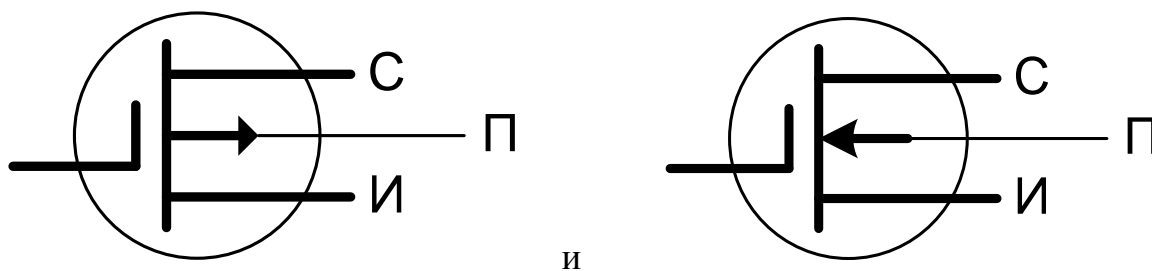
а) n-типа



б) p-типа

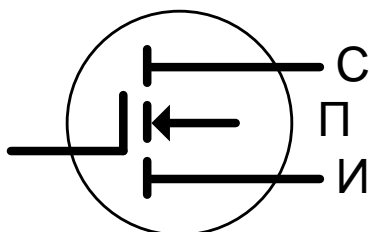


в) с выводом от подложки – с каналом p- и n-типа -

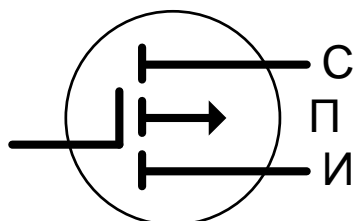


2. МОП-транзисторы с индуцированным каналом:

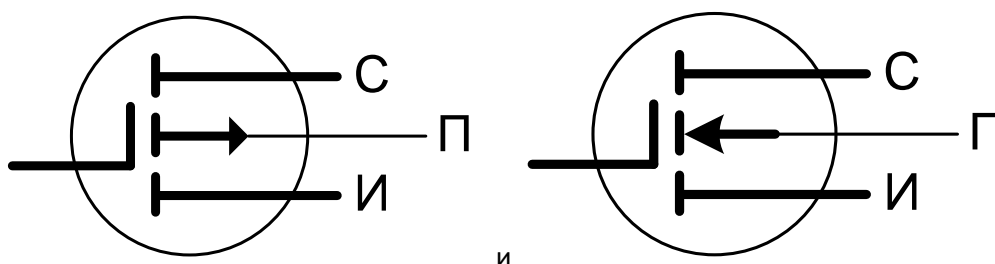
а) n-типа



б) р-типа



в) с выводом от подложки с каналом р- и n-типа -



Принцип действия всех МОП-транзисторов основан на эффекте изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием поперечного электрического поля. Приповерхностный слой полупроводника является токопроводящим каналом этих транзисторов.

МОП-транзисторы со встроенным каналом

Технология изготовления:

В исходной пластине Si р-типа по диффузионной технологии созданы области И, С и канал n-типа. SiO₂ служит для защиты поверхности и изоляции затвора от канала. Вывод подложки П (если он есть) иногда присоединяют к источнику И (рис. 8).

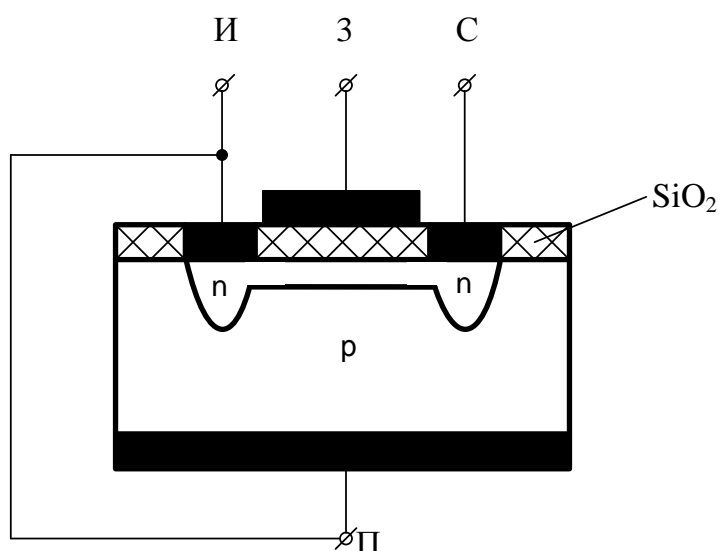


Рисунок 8. Структура и подключение напряжений к МОП-транзистору со встроенным каналом n-типа

Рассмотрим влияние напряжений $U_{си}$ и $U_{зи}$ на проводимость канала и протекающий ток.

1) Влияние напряжения $U_{си}$

$U_{зи}=0$, тогда проводимость канала будет равна исходной, имеем некоторую стоковую характеристику $I_c=f(U_{си})$.

Её вид (рис. 9) определяется теми же факторами, что и у транзистора с рп-переходом.

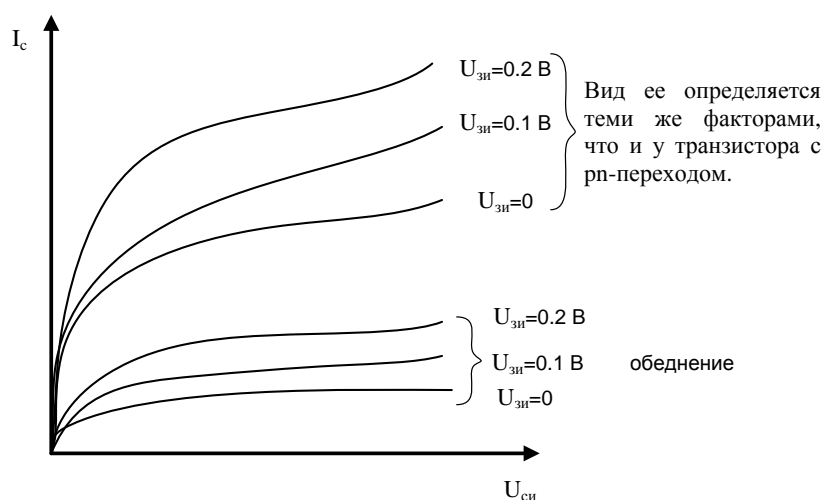


Рисунок 9. Стоковые характеристики МОП-транзистора со встроенным каналом n-типа

- 2) Большой отрицательный потенциал на затворе (рис. 10) оказывает отталкивающее действие на носители заряда в канале (одинаковые знаки), поэтому концентрация их в канале уменьшается, проводимость канала падает, I_c уменьшается при том же значении $U_{си}$. Такой режим называется **режимом обеднения**. Характеристики лежат ниже характеристики, полученной при $U_{зи}=0$.

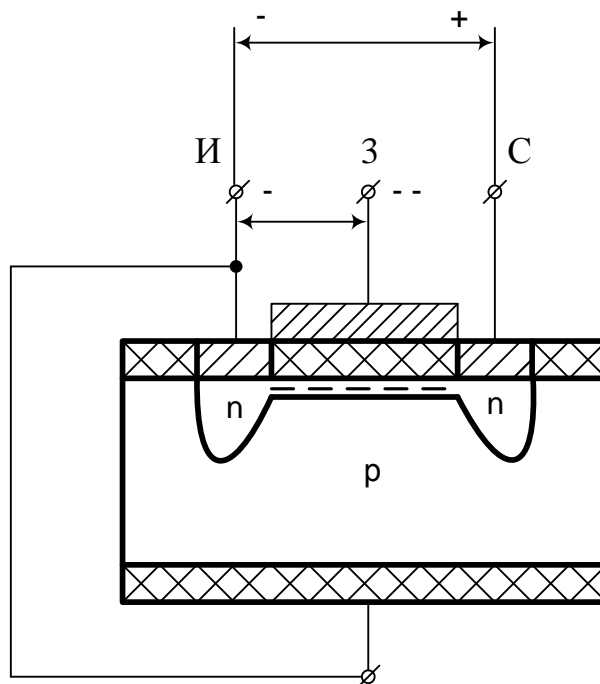


Рисунок 10. Структура и подключение напряжений к МОП-транзистору со встроенным каналом n-типа в режиме обеднения

- 3) Положительный потенциал на затворе 3 (рис. 11) притягивает электроны из p-области в n-область, концентрация носителей заряда в канале увеличивается, I_c увеличивается. Такой режим называется **режимом обогащения** – характеристики проходят выше характеристики, снятой при $U_{зи}=0$.

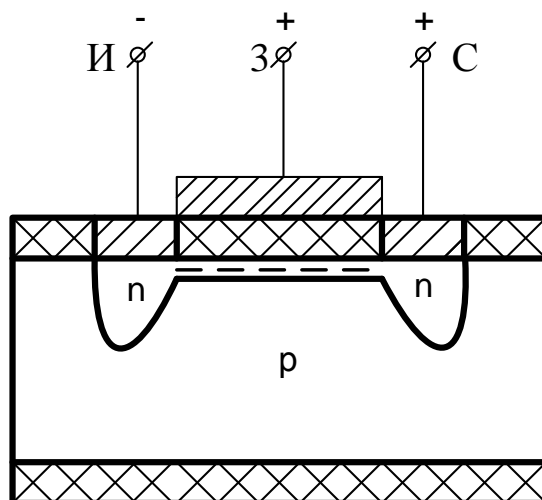


Рисунок 11. Структура и подключение напряжений к МОП-транзистору со встроенным каналом n-типа в режиме обогащения

Стоко-затворная характеристика (рис. 12) строится, как и для транзистора с pn-переходом, по точкам стоковой характеристики.

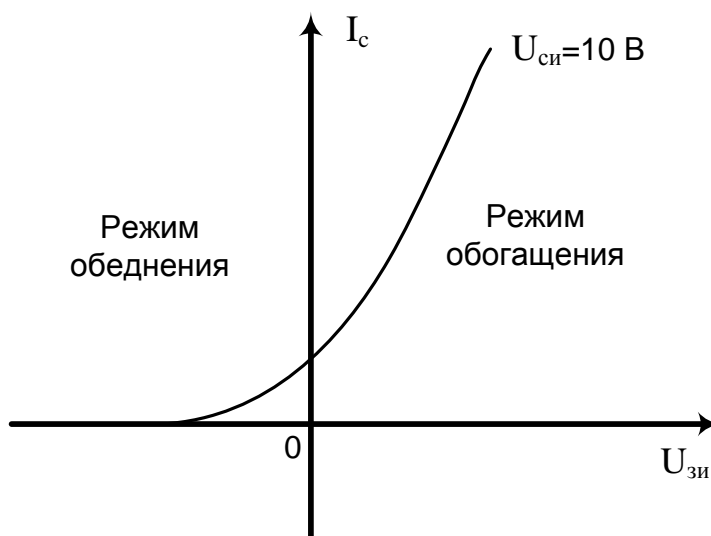


Рисунок 12. Стоко-затворная характеристика МОП-транзистора со встроенным каналом n-типа

МОП-транзисторы с индуцированным каналом

Канал специально не создается путем диффузии, а индуцируется (образуется) путем приложения к затвору положительного напряжения (рис. 13). При этом электроны p-области перемещаются по направлению к затвору, концентрация их увеличивается, тип проводимости в подзатворной области меняется:

из р-типа он превращается в n-тип, образуется канал n-типа. Чем больше «+», приложенный к затвору, тем больше концентрация электронов, тем выше I_c .

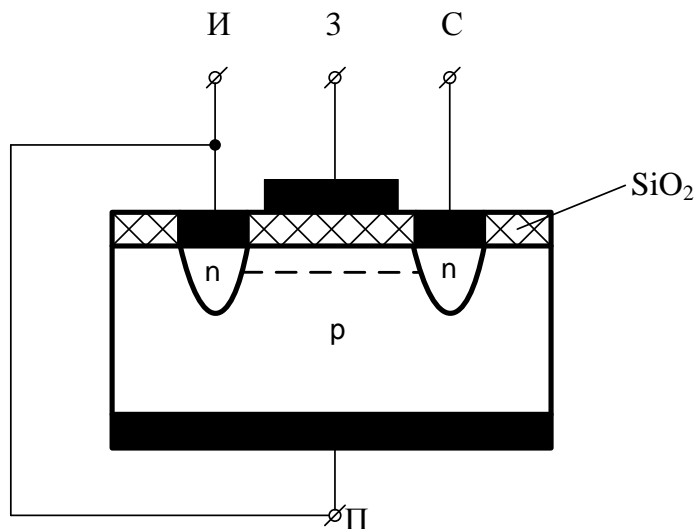


Рисунок 13. Структура МОП-транзистора с индуцированным каналом n-типа

Естественно, если к затвору З приложить «-», т.е. $U_{зи} < 0$, то канал образовываться не будет.

Таким образом, этот тип транзистора будет работать **только в режиме обогащения**. При $U_{зи} = 0$ $I_c = 0$, т.к. канала не образуется (рис. 14).

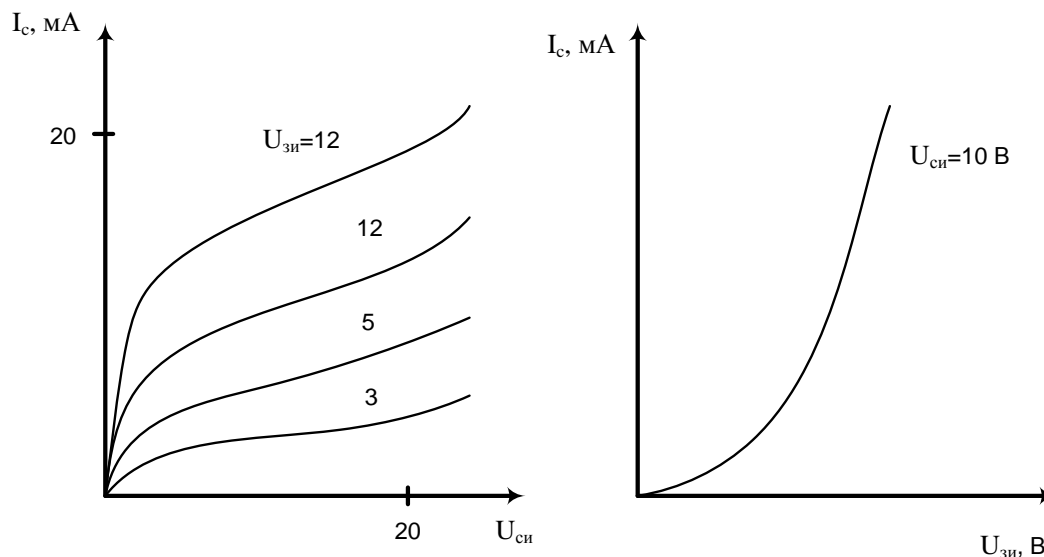


Рисунок 14. Характеристики МОП-транзистора с индуцированным каналом n-типа

ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

n-МОП технология

Логические элементы выполняются на n-канальных МОП-транзисторах, соединенных последовательно и параллельно.

Нарисуем схему из двух соединенных транзисторов с индуцированным каналом n-типа (рис. 15). Мы уже рассматривали этот тип МОП-транзистора и говорили, что он работает только в режиме обогащения. Такой транзистор называют еще *нормально закрытым*: при $U_{зи}=0$ $I_c=0$, т.е. он соответствует переключателю, размыкающему цепь при нулевом напряжении на затворе.

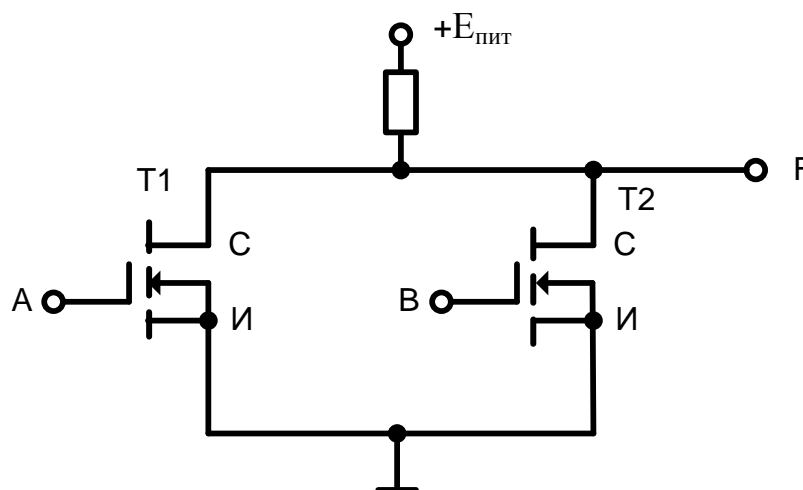


Рисунок 15. Функциональная схема двух-входового элемента ИЛИ-НЕ

Подадим $A=0$ и $B=0$, т.е. на затвор обоих транзисторов подадим $U_{зи}=0$. Транзисторы T1 и T2 при этом закрыты, $I_c=0$. Цепь между источником питания и землей разомкнута, падения напряжений в ней нет, поэтому на выходе F будет приложен весь потенциал источника, т.е. $F=1$.

Если хотя бы на один вход схемы подать 1, т.е. положительное напряжение на Z относительно И, то в соответствующем транзисторе создается n-канал, транзистор начинает проводить ток, т.е. открывается; в точке F будет потенциал, отличающийся от потенциала земли на величину падения напряжения в индуцированном канале (десятые доли вольта), т.е. уровень логического 0. По таблице истинности видно, что получили логическую функцию ИЛИ-НЕ.

A	B	F
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Соединим два транзистора последовательно (рис. 16): сток одного с истоком другого, подложки соединены между собой. Если на оба входа подать 1, т.е. $U_{зи} > 0$, образуются каналы, через транзисторы течет ток, они открыты, образуется цепь между источником питания и землей. На выходе F будет уровень, отличающийся от потенциала земли на величину падения напряжения на двух индуцированных каналах (порядка 0,2 В), т.е. $F=0$. Если хотя бы на один вход подать 0, то соответствующий транзистор будет закрыт, цепочка не собирается и на выходе будет практически потенциал источника питания $\approx E_{пит}$, т.е. $F=1$. Таким образом, получили И-НЕ.

ОСТАВИТЬ МЕСТО ПОД РАСШИРЕННУЮ ТАБЛИЦУ ИСТИННОСТИ

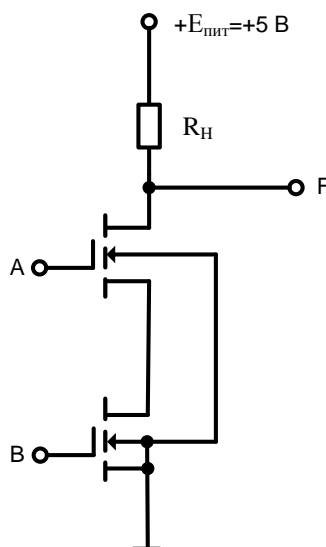


Рисунок 16. Функциональная схема двух-входового элемента И-НЕ

Схема инвертора может быть получена из рис. 15 или 16 исключением одного из транзисторов.

ОСТАВИТЬ МЕСТО ПОД РИСУНОК ДЛЯ СХЕМЫ ИНВЕРТОРА

рМОП – технология

Логические элементы, изготовленные по этой технологии, строятся на МОП-транзисторах с индуцированным каналом р-типа, соединенных между собой.

Рассмотрим принцип действия такого транзистора (рис. 17): когда $U_{зи}=0$, тогда канала нет и при любой полярности $U_{си}$ $I_c=0$. Для создания канала р-типа нужно создать отток электронов из области n-слоя, прилегающей к затвору. Для этого на З подают отрицательный потенциал, электроны уходят из области затвора, тип проводимости меняется на противоположный, создается канал р-типа. Теперь, если приложить $U_{си} > 0$, т.е. «+» к И, «-» к стоку, будет происходить направленное движение дырок от И к С, по транзистору потечет ток. Таким образом, данный транзистор также работает в режиме обогащения, является нормально закрытым, как и рассматриваемый ранее «МОП-транзистор».

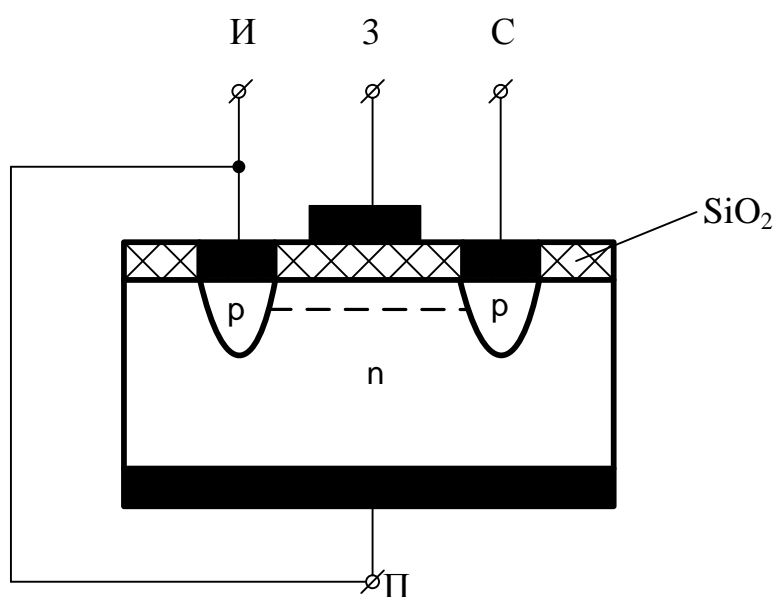


Рисунок 17. Структура рМОП-транзистора с индуцированным каналом

Соответственно и логические схемы такие же, что для nМОП-элементов, но $U_{пит} = -5$ В и обозначение транзисторов иное.

НАРИСОВАТЬ 2-ВХОДОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И-НЕ,

ИЛИ-НЕ И ИНВЕРТОР

Логические элементы на КМОП-структурах

КМОП – комплиментарный (комбинированный), металл, окисел, полупроводник - структура, построенная на нормально закрытых транзисторах с индуцированными каналами обоих типов.

Базовой схемой является КМОП-инвертор (рис. 18). Он состоит из двух транзисторов с индуцированным каналом различного типа, соединенных между собой затворами. - Работа схемы основана на том, что транзистор с индуцированным каналом будет закрыт до тех пор, пока на его затвор не будет подан потенциал, достаточный для повышения концентрации основных носителей заряда вблизи затвора настолько, чтобы образовался канал. Критическое значение разности потенциалов между З и И (и П), при котором образуется канал, называется пороговым ($U_{\text{порог}}$).

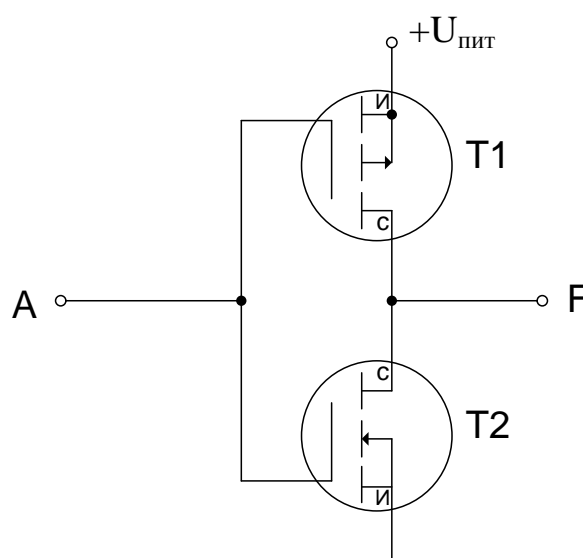


Рисунок 18. Функциональная схема КМОП-инвертора

Рассмотрим транзистор T1. Он имеет индуцированный канал p-типа. Его исток И соединен с подложкой и подключен к $+U_{\text{пит}}$. Для образования канала p-типа нужно подать на затвор потенциал меньший, чем $+U_{\text{пит}}$ (потенциал подложки), чтобы «оттолкнуть» электроны из области затвора. До тех пор, пока потенциал затвора не будет отличаться от $+U_{\text{пит}}$ на величину, большую $U_{\text{порог}}$, транзистор будет закрыт. При превышении этого значения – откроется (рис. 19).

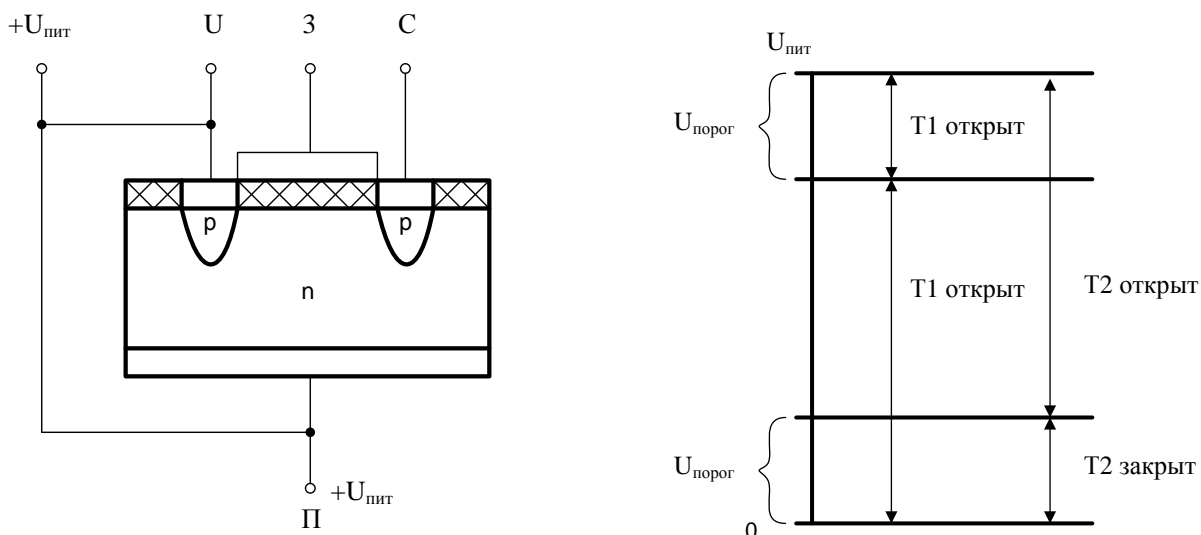


Рисунок 19. Подключение транзистора T1 и анализ его состояния

Теперь рассмотрим T2. У него индуцируется канал n-типа. Исток соединен с затвором и подключен на землю (рис 20). До тех пор, пока потенциал затвора не будет превышать потенциал земли на величину, большую $U_{\text{порог}}$, T2 будет закрыт (рис. 19).

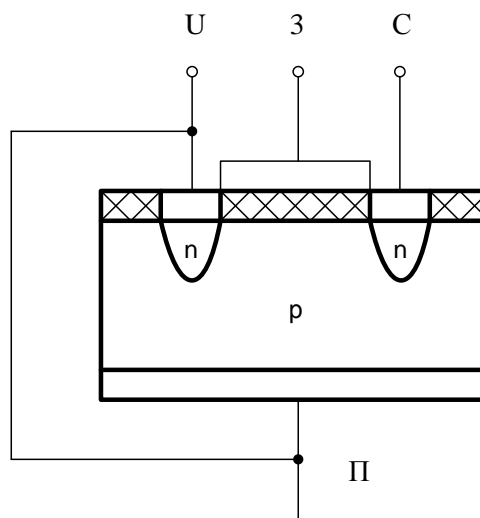


Рисунок 20. Подключение транзистора T2

Таким образом, получаем 3 области в диапазоне изменения $U_{\text{вх}}$ от 0 до $+U_{\text{пит}}$ (рис. 19):

- 1) T1 открыт; T2 закрыт: $0 < U_{\text{вх}} < U_{\text{порог}}$
- 2) T1 и T2 открыты: $U_{\text{порог}} < U_{\text{вх}} < +U_{\text{пит}} - U_{\text{порог}}$
- 3) T1 закрыт; T2 открыт: $+U_{\text{пит}} - U_{\text{порог}} < U_{\text{вх}} < +U_{\text{пит}}$

Принимая за логический «0» потенциал земли, а за логическую «1» потенциал, близкий к потенциалу источника питания, получим следующее:

- 1) $A=0$: T1 открыт, T2 закрыт; на F подается потенциал, близкий к $+U_{пит}$, т.е. $F=1$;
- 2) $A=1$: T1 закрыт, T2 открыт; на F подается потенциал, близкий к потенциалу земли, т.е. $F=0$.

Выбирая $U_{пит}=+5В$, получим схему, совместимую с ТТЛ.

Логический элемент ИЛИ – НЕ на КМОП

Верхние транзисторы T1 и T2 с каналами р-типа соединены последовательно, нижние транзисторы T3 и T4 с каналами n-типа соединены параллельно (рис. 21).

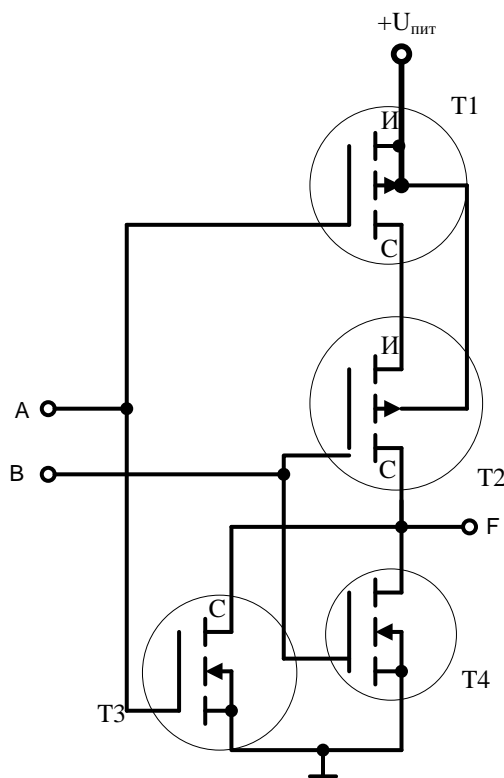


Рисунок 21. Схема двух-входового элемента ИЛИ-НЕ КМОП-технологии

Если $A=0$: T1 открыт, T3 закрыт ($+U_{пит}$).

$A=1$: T3 открыт, T1 закрыт

$B=0$: T2 открыт, T4 закрыт

$B=1$: T4 открыт, T2 закрыт

Теперь составим таблицу истинности:

A	B	Открыты	Закрыты	F
0	0	T1 T2	T3 T4	1
0	1	T1 T4	T3 T2	0
1	0	T3 T2	T1 T4	0
1	1	T3 T4	T1 T2	0

Логический элемент И – НЕ КМОП-технологии

Верхние транзисторы T1 и T2 с каналами р-типа соединены параллельно, нижние транзисторы T3 и T4 с каналами n-типа соединены последовательно (рис. 22).

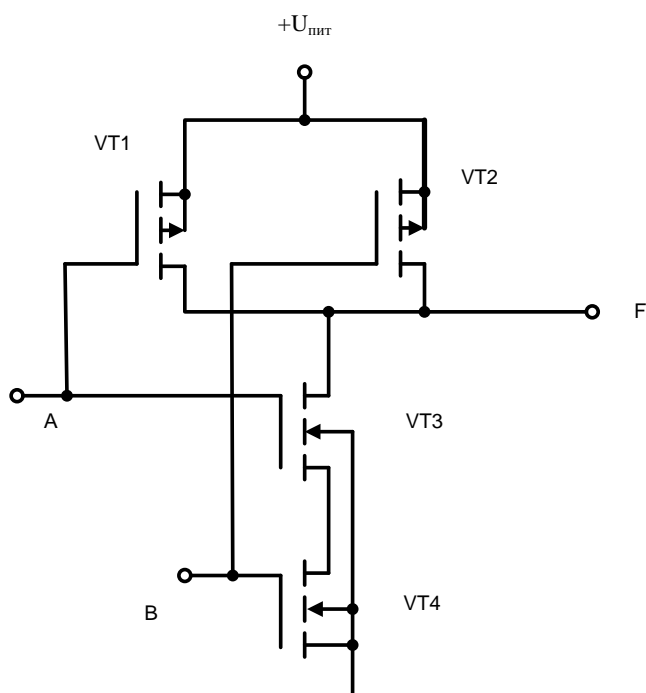


Рисунок 22. Функциональная схема двух-входового элемента И-НЕ по КМОП-технологии

Заполним таблицу истинности:

A	B	Открыты	Закрыты	F
0	0	VT1 VT2	VT3 VT4	1
0	1	VT1 VT3	VT2 VT4	1
1	0	VT2 VT4	VT1 VT3	1
1	1	VT3 VT4	VT1 VT2	0